

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

ANÁLISIS DE RECUPERACIÓN ELÁSTICA EN DOBLADO DE CHAPA GRUESA DE ALUMINIO

Autor: Félix Antonio Galisteo Vicente

Tutora: Aída Estévez Urrea

Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

ANÁLISIS DE RECUPERACIÓN ELÁSTICA EN DOBLADO DE CHAPA GRUESA DE ALUMINIO

Autor:

Félix Antonio Galisteo Vicente

Tutora:

Aída Estévez Urra

Profesora colaboradora

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: ANÁLISIS DE RECUPERACIÓN ELÁSTICA EN DOBLADO DE CHAPA GRUESA DE ALUMINIO

Autor: Félix Antonio Galisteo Vicente

Tutora: Aida Estévez Urra

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

Hay una persona que merece ser mencionada ante todo como una gran fuente de inspiración y ejemplo, mi hermano David, que a pesar de no estar entre nosotros me ha ayudado a llegar hasta donde estoy, ya que cuando mis fuerzas flaqueaban, me acordaba de él y me permitía continuar, gracias por todo hermano.

Mi profesora Aída, la cual no sólo ha sido partícipe de este proyecto, sin la cual no hubiera sido posible, sino que también ha sido un referente tanto a nivel académico como a nivel personal, bellísima persona y excelente profesora.

A mis padres y a mi hermano Esteban, y a toda mi familia por aguantarme todas las idas y venidas derivados de los delirios consecuencia de tantas horas de estudio y sacrificio, y a pesar de todo ello, seguir apoyándome, gracias de corazón.

A mis amigos de toda la vida, los que puede pasar meses sin ver, cada uno con su vida y mantener la misma relación, los que siempre están ahí, en especial mi hermano de otra madre Fran, el cual es un referente para mi y una persona sin la cual esto no hubiera sido posible llegar hasta donde estoy, gracias de verdad hermano.

A Guille, el cual teniendo que sufrir lo mismo que yo ya que estudiábamos lo mismo, siempre tenía una sonrisa y un consejo que darte, no siendo posible acabar este grado sin su ayuda tanto académica como personal, muchísimas gracias Labra.

A los maestros de taller Antonio y Manuel, por proporcionarme su conocimiento de tantísimas horas de taller en mis manos, siendo su ayuda vital en el desarrollo de este proyecto.

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes	1
1.1.1	Doblado al aire	5
1.1.2	Doblado en V a fondo.....	5
1.1.3	Doblado con dado deslizante	6
1.1.4	Doblado giratorio y doblado con rodillos.....	6
1.2	Objetivos	7
1.3	Tareas a desarrollar	8
2	Proceso de doblado.....	10
2.1	Atributos mecánicos de las hojas metálicas.....	10
2.1.1	Elongación	10
2.1.2	Anisotropía	13
2.1.3	Tamaño de grano.....	13
2.1.4	Resistencia al mellado de las hojas metálicas	14
2.2	Ensayos para hojas metálicas.....	15
2.2.1	Prueba de copa.....	15
2.2.2	Diagramas de límites de formado	16
2.3	Parámetros de doblado	18
2.3.1	Radio mínimo de doblado	20
2.3.2	Recuperación elástica.....	22
2.3.3	Fuerza de doblado	32
2.4	Tensiones residuales	33
2.5	Equipos para el formado de láminas de metal.....	34
2.6	Consejos prácticos para el plegado de láminas de aluminio.....	35
3	Proceso experimental.....	37
3.1	Máquina de doblado DISMA TRIS.....	37
3.2	Acondicionamiento de la máquina de doblado	39
3.3	Funcionamiento de la máquina de doblado.....	44
3.4	Probetas para ensayos	47
3.4.1	Diseño y fabricación de probetas.....	47
3.4.2	Caracterización del material.....	49

3.5	Ensayos	50
3.5.1	Variables experimentales	50
3.5.2	Ensayo 1.....	50
3.5.3	Ensayo 2.....	51
3.5.4	Ensayo 3.....	53
3.6	Toma de datos de resultados experimentales	54
3.7	Resultados de los ensayos.....	61
4	Análisis de resultados	65
4.1	Resultados teóricos sobre recuperación elástica	65
4.2	Cálculo de posición de la línea neutra.....	68
4.2.1	Cálculo de XL_N mediante coeficiente ψ	69
4.2.2	Cálculo de XL_N de forma aproximada	69
4.3	Comparación entre resultados teóricos y experimentales	69
4.3.1	Influencia del material sobre la recuperación elástica.....	72
4.3.2	Influencia del ángulo de doblado sobre la recuperación elástica	74
4.3.3	Influencia de la holgura sobre la recuperación elástica	76
4.4	Radio de doblado.....	86
4.4.1	Análisis de radios de doblado finales	86
5	Conclusiones.....	92
6	Trabajos futuros	93
6.1	Propuestas de mejora.....	93
7	Bibliografía.....	94
	Anexo.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Curva esfuerzo-deformación (Montes J.M., Cuevas F.G. y Cintas J., 2014) [3].....	1
Figura 1.2. Tracción y compresión en lámina plegada (MIPSA,2018) [12].....	2
Figura 1.3. Prensa para doblado (Agranjo,2011) [13].	3
Figura 1.4. Detalle punzón-matriz (Agranjo,2011) [14].....	3
Figura 1.5. Doblado al aire (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2014) [7].	3
Figura 1.6. Doblado en V a fondo (Desconocido, s.f) [8].....	4
Figura 1.7. Doblado en U (Prasanna M.N, 2013) [9].	4
Figura 1.8. Doblado con dado deslizante (Censa Industrial, s.f) [10].....	4
Figura 1.9. Doblado giratorio (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2014) [7].	4
Figura 1.10. Doblado con rodillos (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2014) [7].	4
Figura 1.11. Simulación mediante elementos finitos (Chen, L. et al.,2014) [18]	8
Figura 1.12. Máquina de doblado usada.	8
Figura 2.13. Curva esfuerzo-deformación para un metal a tracción (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].	10
Figura 2.14. Detalle curva esfuerzo-deformación (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].....	11
Figura 2.15. Intervalo de fluencia en curva esfuerzo-deformación (Torres Hernández, Y., s.f.) [20].	12
Figura 2.16. Bandas de Lüders (Montes J.M., Cuevas F.G. y Cintas J., 2014) [3].	13
Figura 2.17. Detalle de una hendidura sobre una plaquita (Graham, s.f.) [21].	14
Figura 2.18. Máquina de ensayo manual Erichsen (Martín Sanz, M.A., 2013) [22].	15
Figura 2.19. Punzonado sobre lámina metálica en ensayo Erichsen (Martín Sanz, M.A., 2013) [22].....	16
Figura 2.20. Ejemplo de diagrama de límites de formado (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].....	16
Figura 2.21. Longitudes para el cálculo de deformaciones ingenieriles (ASTM E2218-15., 2015) [24].	17
Figura 2.22. Patrón circular para medición de deformaciones ingenieriles (Orlando Tolaba, R., 2017) [25].	17
Figura 2.23. Parámetros de doblado.	18
Figura 2.24. Conservación de la longitud de la línea neutra en la zona de plegado.	19
Figura 2.25. Detalle de pieza plegada.	19
Figura 2.26. Relación entre R/T y la reducción de tensión de área para láminas metálicas (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].	20
Figura 2.27. Influencia de la dirección de los granos en el radio mínimo de plegado (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].	21
Figura 2.28. Núcleo elástico de una lámina de metal (Sheet Metal Bending, s.f.) [11].	23
Figura 2.29. Lámina después de doblado para el cálculo de su desarrollo.....	23

Figura 2.30. Referencia para el cálculo de la posición de la línea neutra.	24
Figura 2.31. Parámetros para el cálculo de L_D según la expresión 2.9.	26
Figura 2.32. Parámetros para ecuación 2.10.	27
Figura 2.33. Restitución elástica tras el doblado (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].	28
Figura 2.34. Comportamiento elasto-plástico perfecto.	30
Figura 2.35 Doblado, fondeado y recuperación elástica (CENSA INDUSTRIAL, 2018) [29].	31
Figura 2.36. Proceso de estirado (Sheet Metal Bending, s.f.) [11].	31
Figura 2.37. Definición de la holgura H según el tipo de doblado (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].	33
Figura 2.38. Distintos bastidores de máquinas de doblado (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].	34
Figura 2.39. Máquina de plegado hidráulica de bastidor tipo C, MEBUSA PH90/30S. (SURPLEX, s.f.) [31].	34
Figura 3.40. Máquina de plegado DISMA TRIS.	37
Figura 3.41. Componentes de la máquina de plegado DISMA TRIS.	38
Figura 3.42. Holgura en doblado con dado deslizante.	38
Figura 3.43. Desmontaje de la máquina DISMA TRIS.	39
Figura 3.44. Taladradora vertical.	40
Figura 3.45. Proceso de soldadura de tornillos (a) y máquina de torneado (b).	40
Figura 3.46. Estado final de la máquina de doblado tras su limpieza y posicionamiento.	40
Figura 3.47. Hendiduras sobre el radio de curvatura de la matriz.	41
Figura 3.48. Planificadora tangencial para rectificado (a) y mecanizado del radio de curvatura (b).	42
Figura 3.49. Matriz tras acondicionamiento.	42
Figura 3.50. Comprobación del radio de curvatura con galga a través de proyector de perfiles.	42
Figura 3.51. Utillaje auxiliar para la matriz.	43
Figura 3.52. Utillaje regulador de holgura.	43
Figura 3.53. Herramienta para roscar y machos.	44
Figura 3.54. Proceso para el doblado de materiales con máquina DISMA TRIS.	45
Figura 3.55. Goniómetro.	45
Figura 3.56. Bloques patrón usados para medir holguras.	46
Figura 3.57. Proceso para el doblado de materiales con máquina DISMA TRIS.	46
Figura 3.58. Proceso para el doblado de materiales con máquina DISMA TRIS, paso 8.	47
Figura 3.59. Palpador electrónico de exteriores Mahr 838 EA.	47
Figura 3.60. Diseño de la probeta escogido. Dimensiones en mm	48
Figura 3.61. Cortado de probetas con sierra de cinta portátil.	49

Figura 3.62. Tabla resumen del ensayo 1.....	51
Figura 3.63. Tabla resumen del ensayo 2.1.....	52
Figura 3.64. Tabla resumen del ensayo 2.2.....	52
Figura 3.65. Tabla resumen del ensayo 2.3.....	53
Figura 3.66. Tabla resumen del ensayo 3.....	53
Figura 3.67. Galgas de radio.....	54
Figura 3.68. Detalle de defectos de doblado, marcas de matriz y wrinkling.....	55
Figura 3.69. Medición de radios de curvatura mediante microscopía.....	55
Figura 3.70. Máquina pulidora Struers LaboPol-5.....	56
Figura 3.71. Antes y después del pulido de la probeta para análisis de la deformación de las fibras.....	56
Figura 3.72. Ataque de probeta con Keller.....	57
Figura 3.73. Proceso de electrograbado.....	57
Figura 3.74. Probeta 6 para análisis de la línea neutra.....	58
Figura 3.75. Patrones usados para el procesado a partir del programa Argus.....	58
Figura 3.76. Mallado de la probeta con Argus a partir del patrón grabado con electrólisis.....	59
Figura 3.77. Representación de las mayores deformaciones en escala logarítmica con Argus.....	59
Figura 3.78. Representación de las menores deformaciones en escala logarítmica con Argus.....	59
Figura 3.79. Representación de la línea neutra en la probeta 6.....	60
Figura 3.80. Representación de las mayores frente a las menores deformaciones sobre la probeta 6 en la sección representada en azul oscuro de la figura 3.79.....	60
Figura 3.81. Medida del ángulo de doblado de una probeta mediante el proyector de perfiles.....	61
Figura 3.82. Resultados de la realización de los ensayos.....	64
Figura 4.83. Probetas 1, 2 y 3 para la representación de las recuperaciones elásticas según la gráfica 4.8.....	77
Figura 4.84. Probetas 4, 7 y 8 para la representación de la recuperación elástica según la gráfica 4.9....	78
Figura 4.85. Probetas 9, 10 y 11 para la representación de la recuperación elástica según la gráfica 4.10.....	80
Figura 4.86. Probetas 12, 13 y 14 para la representación de la recuperación elástica según la gráfica 4.11.....	81
Figura 4.87. Probetas 15, 16 y 17 para la representación de la recuperación elástica según la gráfica 4.12.....	82
Figura 4.88. Probetas 21, 22 y 23 para la representación de la recuperación elástica según la gráfica 4.13.....	83
Figura 4.89. Probetas 27, 28 y 29 para la representación de la recuperación elástica según la gráfica 4.14.....	84

Figura 4.90. Momento aplicado sobre el material plegado. 85

Figura 4.91. Justificación del efecto de una mayor holgura sobre el material. 85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Tabla con valores de K y n para algunos materiales (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1]....	12
Tabla 2.2. Escala ASTM de tamaños de grano (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].	14
Tabla 2.3. Dependencia de resistencia al mellado con diversos parámetros.	15
Tabla 2.4. Radio mínimo de doblado para diversos materiales (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1]....	21
Tabla 2.5. Dependencia de radio mínimo de doblado con diversos parámetros.	22
Tabla 2.6. Valores de ψ para el cálculo de la línea neutra.	24
Tabla 2.7. Recomendaciones sobre la posición de la línea neutra para láminas de acero plegadas a 90°.25	
Tabla 2.8. Coeficientes K_1 y K_2	26
Tabla 2.9. Valores de K para la ecuación 2.10.	27
Tabla 2.10. Valores de λ para el cálculo del radio de curvatura de la línea neutra.	30
Tabla 2.11. Dependencia de la recuperación elástica con diversos parámetros.	32
Tabla 2.12. Factores K para el tipo de doblado.	33
Tabla 3.13. Secciones máximas de materiales plegables (DISMA, s.f.) [32].	39
Tabla 3.14. Número y espesor de probetas de los 4 tipos de aluminios disponibles.	48
Tabla 3.15. Dureza de materiales.	49
Tabla 3.16. Denominación para cada aluminio.	50
Tabla 3.17. Combinaciones de bloques patrón usadas.	54
Tabla 3.18. Resultados de los ensayos del material 1.	62
Tabla 3.19. Resultados de los ensayos del material 2.	62
Tabla 3.20. Resultados de los ensayos del material 3.	63
Tabla 3.21. Resultados de los ensayos del material 4.	63
Tabla 4.22. Valores numéricos de propiedades para el cálculo de recuperaciones elásticas.	65
Tabla 4.23. Valores del radio de curvatura de la línea neutra.	66
Tabla 4.24. Recuperación elástica experimental y teórica para material 1.	67
Tabla 4.25. Recuperación elástica experimental y teórica para material 2.	67
Tabla 4.26. Recuperación elástica experimental y teórica para material 3.	68
Tabla 4.27. Recuperación elástica experimental y teórica para material 4.	68
Tabla 4.28. Valores de XL_N para la probeta 6.	69
Tabla 4.29. Comparativa entre recuperación elástica experimental y teórica para material 1.	69
Tabla 4.30. Comparativa entre recuperación elástica experimental y teórica para material 2.	70
Tabla 4.31. Comparativa entre recuperación elástica experimental y teórica para material 3.	70
Tabla 4.32. Comparativa entre recuperación elástica experimental y teórica para material 4.	71

Tabla 4.33. Radios mínimos de doblado según el fabricante para cada material..... 86

ÍNDICE DE ECUACIONES

(2.1)	11
(2.2)	11
(2.3)	17
(2.4)	20
(2.5)	25
(2.6)	25
(2.7)	25
(2.8)	25
(2.9)	26
(2.10)	27
(2.11)	28
(2.12)	28
(2.13)	28
(2.14)	28
(2.15)	28
(2.16)	28
(2.17)	28
(2.18)	29
(2.19)	29
(2.20)	29
(2.21)	30
(2.22)	32
(2.23)	32
(2.24)	33
(2.25)	36
(3.26)	52

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1. Recuperación elástica para todos los materiales con $H=0,5T$ y $\alpha_i=60^\circ$	72
Gráfica 4.2. Recuperación elástica para todos los materiales con $H=0,75T$ y $\alpha_i=60^\circ$	73
Gráfica 4.3. Recuperación elástica para todos los materiales con $H=1T$ y $\alpha_i=60^\circ$	73
Gráfica 4.4. Valores de recuperación elástica para material 1 y todos los ángulos y holguras.	74
Gráfica 4.5. Recuperaciones elásticas para material 1 con $H=0,5T$ junto a valores teóricos.....	75
Gráfica 4.6. Recuperaciones elásticas para material 1 con $H=0,75T$ junto a valores teóricos.....	75
Gráfica 4.7. Recuperaciones elásticas para material 1 con $H=1T$ junto a valores teóricos.....	76
Gráfica 4.8. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 1 y ángulo inicial de 60°	77
Gráfica 4.9. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 1 y ángulo inicial de 90°	78
Gráfica 4.10. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 1 y ángulo inicial de 120°	79
Gráfica 4.11. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 2 y ángulo inicial de 60°	80
Gráfica 4.12. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 2 y ángulo inicial de 90°	81
Gráfica 4.13. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 3 y ángulo inicial de 60°	82
Gráfica 4.14. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 4 y ángulo inicial de 60°	83
Gráfica 4.15. Comparativa de recuperaciones elásticas experimentales para todos los materiales y ángulo inicial de 60°	84
Gráfica 4.16. Radios finales de plegado para material 1 con $H=0,5T$	87
Gráfica 4.17. Radios finales de plegado para material 1 con $H=0,75T$	87
Gráfica 4.18. Radios finales de plegado para material 1 con $H=1T$	88
Gráfica 4.19. Radios finales de doblado para material 1 a 60°	88
Gráfica 4.20. Radios finales de doblado para material 1 a 90°	89
Gráfica 4.21. Radios finales de doblado para material 1 a 120°	89
Gráfica 4.22. Radios finales de doblado para $H=0,5T$ y 60°	90
Gráfica 4.23. Radios finales de doblado para $H=0,75T$ y 60°	90
Gráfica 4.24. Radios finales de doblado para $H=1T$ y 60°	91

1 INTRODUCCIÓN

No encuentres la falta, encuentra el remedio.

- Henry Ford -

En este capítulo introductorio se pretende describir de manera somera el proceso de doblado, junto a sus diferentes variantes y características. Por otra parte, se explicará cuáles son los objetivos del presente trabajo, así como las tareas a desarrollar para cumplir los anteriores.

1.1 Antecedentes

Según Kalpakjian y Schmid [1], la gran mayoría de elementos de uso cotidiano tienen realizadas de alguna manera u otra al menos un proceso de doblado, por lo tanto, se puede considerar el *doblado* como una de las operaciones más frecuentes en la fabricación de productos masivos tales como carrocerías para automóviles, utensilios de cocina, latas de conserva, etc.

El *doblado* forma parte de los llamados procesos de conformado, donde es necesario alcanzar el límite de fluencia (S_f en la figura 1.1) y llegar así a la región plástica para producir las piezas por dicho proceso, según Salazar [2].

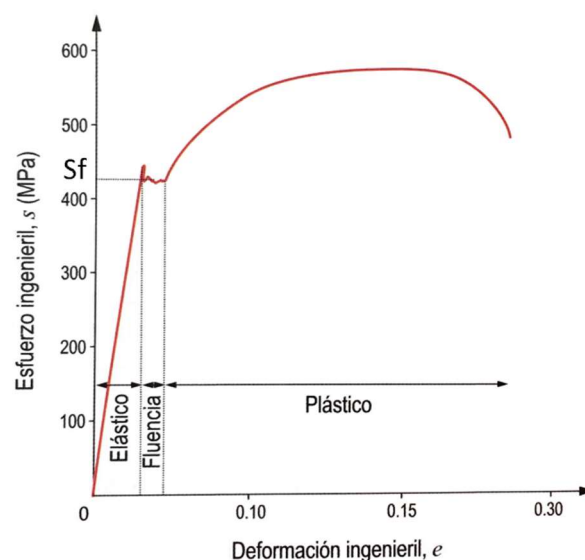


Figura 1.1. Curva esfuerzo-deformación (Montes J.M., Cuevas F.G. y Cintas J., 2014) [3].

Para alcanzar dicha región plástica sobre la pieza, se deforma la misma alrededor de un eje creando un cambio de geometría sin apenas variar el espesor, por lo que, como ocurre en otros procesos de conformado, el volumen de la pieza permanece constante. Pudiera ser que disminuyera algo el espesor durante la operación de plegado, pero lo habitual es que permanezca constante. La utilidad del plegado no es sólo una cuestión de ornamento y estética, sino también de mejoras mecánicas, en concreto aumentando el momento de inercia de la zona plegada para así aumentar la rigidez de la pieza. Otra utilidad de este proceso es la de eliminar bordes afilados, como por ejemplo en las latas de conservas [11].

Es de vital importancia conocer las propiedades mecánicas del material que se esté usando, ya que estas jugarán un papel importante en diversos parámetros de doblado como posteriormente veremos en este documento. Una pieza plegada sufre de manera simultánea tracción y compresión, separados ambos estados tensionales mediante la línea neutra, como puede verse en la figura 1.2.

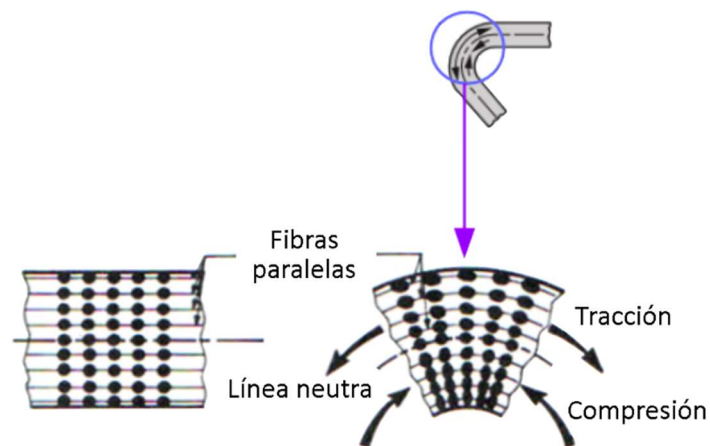


Figura 1.2. Tracción y compresión en lámina plegada (MIPSA,2018) [12].

En la mayoría de las ocasiones el doblado de piezas se realiza en frío (a temperatura ambiente), pero otras veces, por el cambio de propiedades como se verá ahora, puede interesar realizar el proceso en caliente (a temperatura por encima de la de recristalización). La temperatura tiene diversas influencias sobre el material a plegar entre las que se puede destacar [2]:

Conformado en frío:

- Buenos acabados superficiales
- Tolerancias más estrechas
- Mayor precisión
- Necesidad de realizar mayores esfuerzos para conformado

Conformado en caliente:

- Acabados superficiales deficientes
- Peor precisión dimensional
- Mayor capacidad para conformar distintos tipos de metales respecto al trabajo en frío
- Formas y geometrías más complejas

Para llevar a cabo el doblado de piezas [11], existen múltiples tipos de punzones y matrices, los cuales son los elementos básicos de una operación de plegado, junto a una prensa para poder conformar la lámina sobre la matriz (ilustraciones 1.3 y 1.4). Los diferentes punzones y matrices difieren unos de otros por su geometría y/o por su configuración, dando lugar a diferentes dobleces. Las herramientas de doblado pueden ser específicas para un determinado proceso de plegado, con un ángulo de doblado específico, o por el contrario permitir una libre configuración entre un rango de opciones finito. Los materiales usados para las matrices suelen ser hierro gris o acero al carbono, aunque dependiendo del material de la pieza a conformar, existe un gran abanico de diferentes materiales para las herramientas de doblado.



Figura 1.3. Prensa para doblado (Agranjo,2011) [13].



Figura 1.4. Detalle punzón-matriz (Agranjo,2011) [14].

Existen distintos tipos de doblado, diferenciándose cada uno de ellos en cómo se realiza la deformación plástica sobre el material. Algunos de los procesos de doblado más comunes son los que se pueden ver en las siguientes figuras de 1.5 a 1.8:

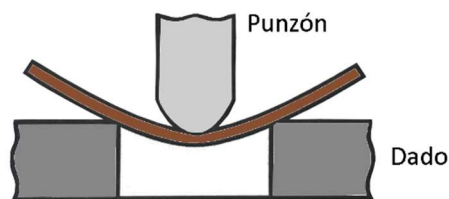


Figura 1.5. Doblado al aire (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2014) [7].

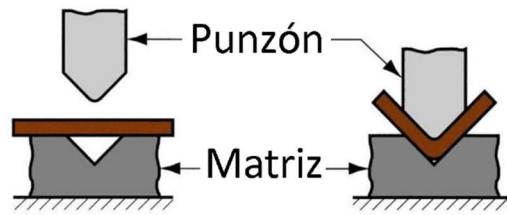


Figura 1.6. Doblado en V a fondo (Desconocido, s.f) [8].

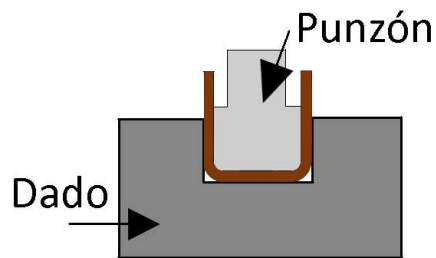


Figura 1.7. Doblado en U (Prasanna M.N, 2013) [9].

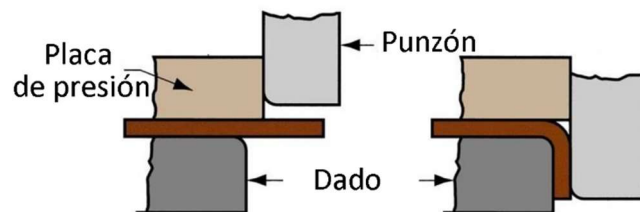


Figura 1.8. Doblado con dado deslizante (Censa Industrial, s.f) [10].

Los procesos de doblado anteriores no son los únicos existentes, hay otros tantos más que, aunque no sean tan utilizados, sí que son dignos de mención (figuras 1.9 y 1.10):

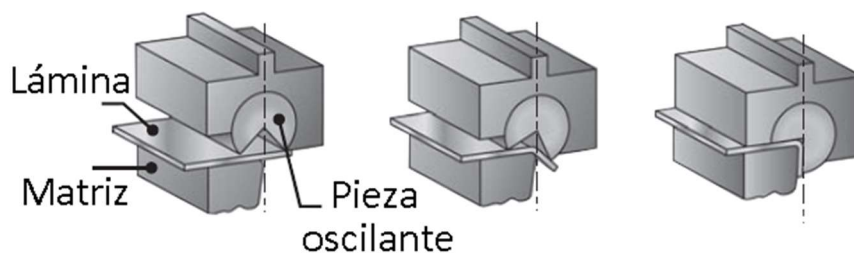


Figura 1.9. Doblado giratorio (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2014) [7].

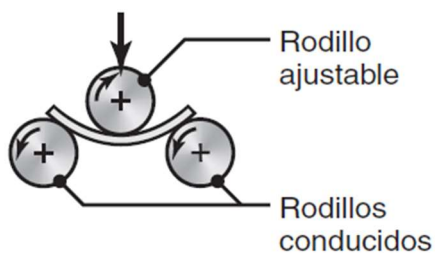


Figura 1.10. Doblado con rodillos (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2014) [7].

A continuación, se va a describir los procesos de doblado mostrados anteriormente en fotos, así como algunas características de estos:

1.1.1 Doblado al aire

Este tipo de doblado se caracteriza por dejar una separación entre lámina y matriz, de tal manera que en ningún momento entran en contacto. El proceso de doblado al aire es bastante común hoy en día en la industria de la fabricación, siendo uno de los métodos de plegado más usados. Se va a mencionar algunas ventajas e inconvenientes del uso de este método [15].

Ventajas:

- Menor tiempo de plegado. Esto es posible frente a otros tipos de doblado gracias a que para evitar la recuperación elástica (proceso por el cual la pieza tiende a recuperar su forma original) se aumenta la penetración del punzón sobre la lámina de metal, acercando las dos partes dobladas de esta entre sí más aún, en vez de aumentar la fuerza de prensado tal y como hacen otros procesos de plegado.
- Rango amplio de doblado. El doblado al aire es capaz de proporcionar un extenso rango de distintos ángulos de doblado para un punzón y matriz dados. Por ejemplo, con un punzón y una matriz de 30°, se pueden llegar a conseguir perfiles de cualquier ángulo entre 30° y 180°.
- Menor fuerza de doblado. El doblado al aire permite el uso de matrices de doblado más anchas, por lo que se reduce la capacidad necesaria de las prensas, pudiendo obtener un rango más amplio de perfiles con la misma capacidad de la prensa respecto a otros tipos de plegado. En resumen, se puede aumentar la productividad sin aumentar los costes.
- Menor fricción entre herramientas y pieza. Al no producirse contacto entre lámina y matriz, por una parte, se obtienen piezas con menos marcas por fricción respecto a otros procesos de doblado, y por otra las herramientas se desgastan menos. De esta manera se produce un ahorro en tiempo y dinero al tener que cambiar con menor frecuencia las herramientas.

Desventajas:

- Menor precisión. Al no producirse el contacto entre pieza-matriz y tener un rango de ángulos más amplio, es más complicado obtener el ángulo deseado frente a otros procesos de plegado.
- Deformaciones indeseadas. Si existe algún tipo de agujero cerca de la línea de doblado, cabe la posibilidad de que se produzcan deformaciones no deseadas.
- Mayor recuperación elástica. Al no presionarse la lámina con la matriz es más probable que este fenómeno sea más agudo. Como consecuencia, se requiere de una mayor destreza por parte del operario frente a otros procesos de doblado.

1.1.2 Doblado en V a fondo

En este proceso de doblado, el punzón incide sobre la lámina de metal hasta que esta toca la matriz en forma de V. El doblado en V es también bastante común en la industria, debido a la posibilidad de obtener un amplio rango de ángulos de doblado con una alta precisión sin tener que usar una prensa de enorme capacidad (aunque el tonelaje de esta tiene que ser bastante más grande que en el caso de doblado al aire). Los ángulos de plegado posibles varían desde ángulos agudos hasta obtusos.

Si una vez que se haya presionado la lámina de metal sobre la matriz, se continúa ejerciendo fuerza sobre la misma, el proceso pasa a denominarse doblado en V a fondo o acuñado. Como consecuencia de

mantener la presión sobre la lámina, se consigue una mayor precisión de doblado, así como ángulos de plegado más grandes.

Otras de las ventajas derivadas de la aplicación de mayor fuerza sobre las láminas, es la posibilidad de eliminar los efectos procedentes de la recuperación elástica al presionar las planchas sobre la matriz, notable ventaja frente al doblado al aire. De esta manera, se puede obtener una buena precisión de plegado independientemente del fenómeno de recuperación elástica.

Como desventaja principal está la necesidad de tener que utilizar una prensa de gran tonelaje, de entre 5 y 8 veces el tonelaje que haría falta para un proceso equivalente de doblado al aire, así como utillajes especiales que por ende son más caros. Por lo que en resumen se podría decir que este método es más preciso, pero más costoso respecto al doblado al aire, siendo útil para mediana y baja producción [16].

1.1.3 Doblado con dado deslizante

El doblado con dado deslizante o doblado de bordes es un proceso de plegado donde el punzón ejerce fuerza sobre una parte de la lámina que se encuentra en voladizo, mientras que la otra parte se encuentra presionada entre la matriz y la llamada placa de presión. Este tipo de doblado suele estar pensado para ángulos rectos y menores de 90°, aunque es posible conseguir máquinas de doblado deslizante para ángulos mayores de 90°, siendo mayor su complejidad de diseño. Esa mayor complejidad se debe a que en dicha situación, el punzón debe ser capaz de transmitir fuerzas horizontales para conseguir correctamente el plegado, por lo que su diseño se complica.

Este proceso se suele utilizar para grandes volúmenes de producción, ya que debe estar justificado su uso por su alto coste como consecuencia de poseer piezas complejas [17].

1.1.4 Doblado giratorio y doblado con rodillos

El proceso de doblado rotatorio es bastante similar al doblado con dado deslizante, debido a la manera parecida en la que se realiza el plegado, sin embargo, tiene algunas diferencias que lo hacen incluso mejor. El punzón tiene un diseño peculiar, formado por un cilindro que gira alrededor de un eje y que presiona la lámina sobre la matriz. Una de las ventajas de este proceso es que no existe placa de presión, ya que el propio punzón realiza su función, simplificando por lo tanto el diseño de este tipo de máquinas. Mediante el doblado giratorio se pueden llegar a conseguir todo tipo de ángulos desde agudos hasta obtusos.

Respecto al doblado con rodillos, este es un proceso que, aunque permite trabajar con diversos espesores y longitudes de láminas, es especialmente útil para espesores pequeños y longitudes grandes. Una máquina de este tipo consta de una serie de rodillos los cuales van introduciendo las láminas y a su vez las van doblando. Las distintas configuraciones de los rodillos, tanto en distancia como en ángulo entre ellos, determinan la curvatura final de las láminas procesadas [11].

Algunos de los procesos de doblado anteriores, al ser métodos de manufacturación bastante extendidos y usados, es de interés el estudio de los fenómenos que ocurren durante y después del plegado. Uno de los fenómenos más importantes a tener en cuenta es la recuperación elástica, proceso por el cual se produce un alivio de tensiones después de retirar la carga sobre la pieza, provocando que esta intente volver a su posición original.

La importancia de predecir y conocer qué parámetros influyen en la recuperación elástica, reside en la posibilidad de disminuir tiempo y costes en la fabricación de piezas por doblado, ya que, normalmente si

se manufacturan dichas piezas sin un modelo analítico o computacional que prediga la recuperación elástica, serán necesarias muchas iteraciones y prototipos hasta conseguir la pieza deseada. La recuperación elástica se suele medir tomando los ángulos iniciales y finales de doblado (ángulo tras retirar la carga y tras la restitución elástica respectivamente) [4].

Las tensiones residuales causantes de la recuperación elástica son producidas por un estado tensional no lineal, por lo que para poder predecir con exactitud la recuperación elástica normalmente se utilizan programas de elementos finitos para su modelado. Para casos más simples o que no requieren demasiada exactitud, se suelen utilizar modelos analíticos, los cuales al realizar diversas hipótesis de carácter lineal no recogen fielmente este fenómeno, pero suelen ser suficientemente precisos para la aplicación deseada. Sin embargo, en la mayoría de los casos tanto si se usa FEM como un modelo analítico, suele realizarse experimentos para corroborar los resultados obtenidos.

Hoy en día se busca mejorar los modelos actuales viendo qué parámetros afectan a la recuperación elástica y de qué manera lo hacen sobre los diferentes procesos de conformado y para los diferentes metales usados. El ángulo de doblado depende principalmente de tres grupos de parámetros [5]:

- Tecnológicos: velocidad de deformación, radio del punzón, tipo de lubricante, condiciones ambientales y tiempo de doblado.
- Material: módulo de elasticidad, límite elástico, tensión de rotura, microestructura del material y orientación de la línea de doblado de acuerdo con la dirección de laminado de la probeta.
- Geométricos: ancho, espesor de las probetas y radio de doblado.

Por otra parte, también puede alterar el ángulo de doblado la precisión de fabricación y el estado de las matrices y bloques de la máquina de doblado.

Dentro de todos los parámetros descritos anteriormente, el parámetro que más influye según Trzepieciniski y Lemu, es el módulo de Young del material. A pesar de todos los avances realizados, no existe manera alguna aún de evitar por completo la recuperación elástica, pero sí que es posible minimizar sus consecuencias para conseguir la pieza deseada, como por ejemplo diseñando la matriz teniendo en consideración el ángulo de recuperación, o cambiando algunos de los parámetros que influyan en la recuperación para minimizar esta [6].

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es proporcionar al lector información sobre la influencia de distintos parámetros de doblado en la recuperación elástica, mediante la realización de diversos experimentos, para doblado con dado deslizante, comparando posteriormente los resultados con las expresiones analíticas existentes, así como con estudios previos. Aunque en la literatura existen una gran cantidad de trabajos sobre recuperación elástica, así como diversos modelos analíticos y computacionales mediante elemento finitos (figura 1.11), estos suelen estar enfocados la gran mayoría a ángulos de doblado de 90°.

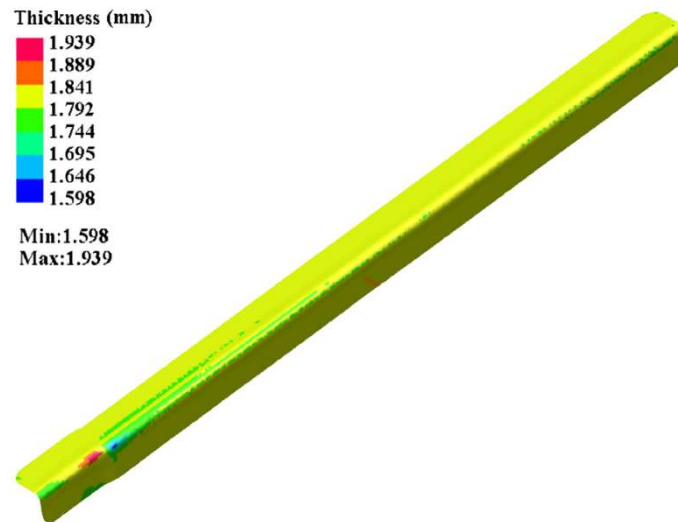


Figura 1.11. Simulación mediante elementos finitos (Chen, L. et al.,2014) [18]

Se realizarán experimentos con probetas de aluminio para ángulos de doblado diferentes variando la holgura entre el dado o matriz y el punzón, ensayadas con la máquina de dado deslizante de ángulo variable de la figura 1.12, la cual se describirá en el próximo capítulo con más detalle.



Figura 1.12. Máquina de doblado usada.

1.3 Tareas a desarrollar

Para poder cumplir con los objetivos, es necesario establecer una serie de tareas a desarrollar, las cuales estarán sujetas a posibles cambios según diversos factores, como por ejemplo la disponibilidad de materiales, de herramientas en el laboratorio, etc. Estas tareas se irán desarrollando con más detalle a lo largo del presente documento.

Para poder realizar los ensayos con la máquina de la figura 1.12, sería necesario realizar unas tareas previas de acondicionamiento sobre esta, ya que fue adquirida de segunda mano y presentaba numerosos desperfectos. Se propuso desmontar la máquina entera, no solo para poder limpiarla con mayor comodidad, sino también para poder entender mejor su funcionamiento, así como para sacar a la luz

defectos ocultos que no fueran perceptibles a simple vista. Por otra parte, también se contemplaría la posibilidad de tener que hacer alguna modificación a la máquina.

No se conocía ni el material concreto de las probetas, ni el número y tamaño de estas, ya que dependía de la disponibilidad de materiales del taller. Aunque se sabía cuál era la clase de material disponible, aluminio, no se tenía conocimiento del tipo de material exacto ni su denominación, por lo que sería necesaria la realización de ensayos de dureza para poder caracterizar los distintos materiales.

Seleccionadas las probetas, sería necesario establecer qué experimentos se iban a realizar, es decir, qué parámetros se iba a evaluar, así como los valores de los parámetros fijos, como el ángulo de doblado inicial. Esta es una parte importante del trabajo, que está condicionada por el número de probetas disponibles, por lo que forzosamente primero habría que seleccionar el número y tipo de estas.

La siguiente tarea consistiría en realizar los ensayos anotando los resultados experimentales de acuerdo con los parámetros seleccionados. Posteriormente se llevaría a cabo un análisis de los resultados experimentales comparándolos con modelos analíticos.

Por último, se sacarían diversas conclusiones de los resultados para poder expresar de manera clara y concisa la influencia de los parámetros elegidos sobre el doblado.

A modo de resumen, se establecen las siguientes tareas a desarrollar en el proyecto:

- Acondicionamiento de la máquina de doblado: limpieza, reparaciones, elección de emplazamiento, etc.
- Caracterización de material y probetas: tipo de material, ensayos de dureza, número de probetas, tamaño de probetas, etc.
- Elección de los ensayos: parámetros a evaluar, parámetros fijos, mediciones adicionales etc.
- Análisis de resultados: influencia del ángulo de doblado inicial, de la holgura y de las características del material sobre la recuperación elástica, posición de la línea neutra, etc.
- Conclusiones.

2 PROCESO DE DOBLADO

En este capítulo se pretende explicar aquellas propiedades de los materiales reseñables de cara al doblado, así como métodos para su comprobación. Por otra parte, se introducirán los diferentes parámetros que intervendrán en el proceso de doblado, describiendo las distintas variables de las que dependen estos y expresiones teóricas que ayudarán a contrastar los resultados experimentales. Por último, se presentarán algunas configuraciones para máquinas de doblado, así como consejos prácticos para el plegado.

2.1 Atributos mecánicos de las hojas metálicas

Se va a comenzar este capítulo revisando someramente algunas de las características mecánicas de los materiales que tienen efectos importantes en el proceso de doblado [1].

2.1.1 Elongación

Supóngase una hipotética probeta de metal sometida a un ensayo de tracción. Según se puede observar en la figura 2.13, en la probeta, a medida que se va aumentando la tensión ejercida sobre la misma, se va produciendo una elongación uniforme hasta que supera el valor de resistencia última de tensión (UTS), valor a partir del cual se empieza a formar un cuello en la probeta y la elongación de esta deja de ser uniforme.

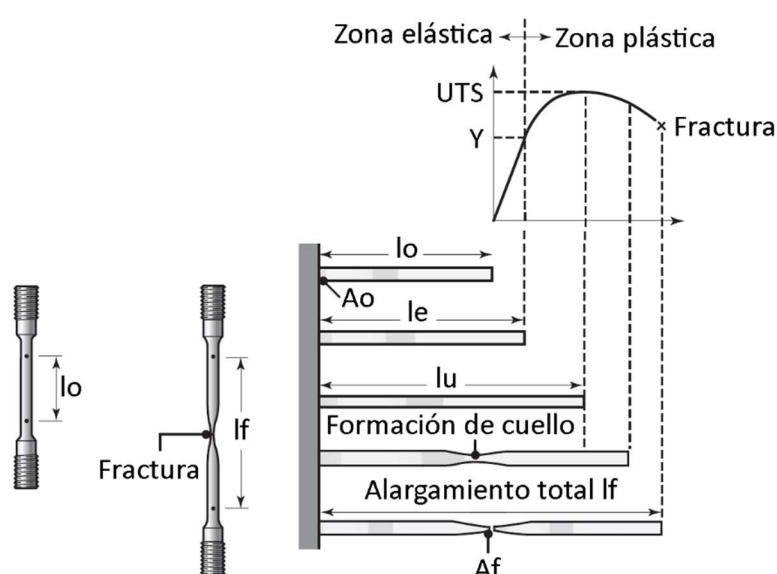


Figura 2.13. Curva esfuerzo-deformación para un metal a tracción (Kalpakjian, S y Schmid, S.R., 2008) [1].

En el doblado de hojas de metal interesa tener una elongación uniforme elevada, para obtener una buena formabilidad de la hoja durante el proceso de plegado. Por esta razón, interesa estar en la curva esfuerzo-deformación entre la región después del esfuerzo de fluencia Y (zona plástica) y antes del valor de UTS (señalado con un círculo en la figura 2.14), conocida como zona de deformación plástica uniforme. El exponente de endurecimiento por deformación (n) de la ecuación de Hollomon (ecuación 2.1) está relacionado con el tipo de elongación que sufre la probeta, donde un valor alto de n es indicativo de una

elongación grande y uniforme. En la tabla 2.1 se pueden ver algunos valores de K y n para distintos materiales para la ecuación 2.1, donde esta modela la región de deformación plástica uniforme de los materiales.

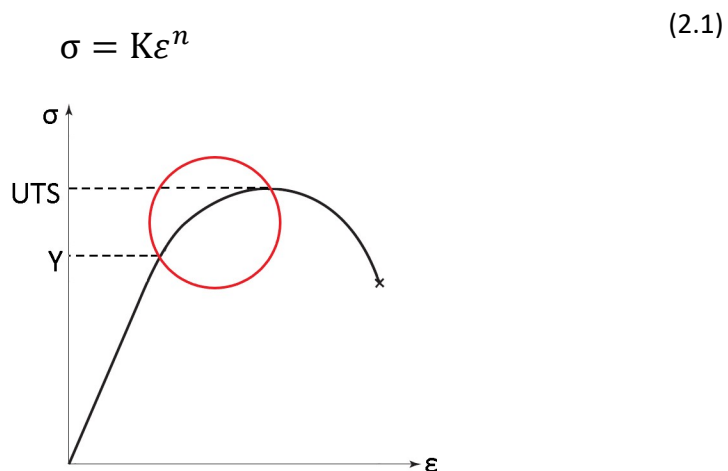


Figura 2.14. Detalle curva esfuerzo-deformación (Kalpakjian, S y Schmid, S.R., 2008) [1].

Si se sobrepasa el valor de tensión UTS, la formación del cuello de la probeta puede ser de dos tipos, dúctil o frágil. El que sea de un tipo u otro depende, entre otras cosas, de la *sensibilidad a la velocidad de deformación (m)* (ecuación 2.2). El coeficiente *m*, está relacionado con la velocidad de deformación del material, ya que mientras más alto sea *m*, mayor será el efecto de la velocidad de deformación y más difícil será conformar el material, ya que un aumento de esta velocidad endurece el material. Sin embargo, en los procesos de conformado como el doblado, normalmente se trabaja en frío por lo que el valor de *m* tenderá a cero, ya que este parámetro no solo depende del material, sino también de la temperatura.

La ecuación 2.2 muestra la relación entre el esfuerzo de fluencia y la velocidad de deformación para trabajo en caliente del material, donde *C* es el coeficiente de resistencia del material.

$$\sigma = C\dot{\varepsilon}^m \quad (2.2)$$

Así mismo, otro de los parámetros útiles para el conformado es la elongación total del material, ya que mientras mayor sea este parámetro mayor conformabilidad tendrá el material.

Como resumen, relativo a la elongación del material y teniendo en consideración que se busca la optimización del doblado de chapa, interesa:

- Compromiso entre cantidad de elongación soportable por el material y esfuerzo a realizar → exponente de endurecimiento por deformación (n) equilibrado.
- Facilidad de conformado → exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación (m) bajo.
- Alta elongación total del material.

Tabla 2.1. Tabla con valores de K y n para algunos materiales (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].

Valores característicos para K y n a temperatura ambiente		
	K (MPa)	n
Aluminio		
1100-O	180	0,20
2024-T4	690	0,16
6061-O	205	0,20
6061-T6	410	0,05
7075-O	100	0,17
Latón		
70-30, recocido	900	0,49
85-15, laminado en frío	580	0,34
Aleación con base cobalto, tratado térmicamente	2070	0,50
Cobre recocido	315	0,54
Acero		
Bajo carbono recocido	530	0,26
4135 recocido	1015	0,17
4135 laminado en frío	1100	0,14
4340 recocido	640	0,15
Inoxidable 304 recocido	1275	0,45
Inoxidable 410 recocido	960	0,10

2.1.1.1 Elongación del punto de fluencia

La elongación del punto de fluencia es un fenómeno por el cual el material tiene dos puntos de límite elástico, uno superior (F_s) y otro inferior (F_i) (figura 2.15), ocurriendo en algunos materiales como aceros con bajo contenido en carbono y ciertas aleaciones de aluminio. Se manifiesta macroscópicamente mediante las denominadas bandas de Lüders, depresiones alargadas sobre la superficie del material tal y como se puede observar en la figura 2.16. Este fenómeno no es deseado en el doblado de láminas, debido a los defectos superficiales que provoca.

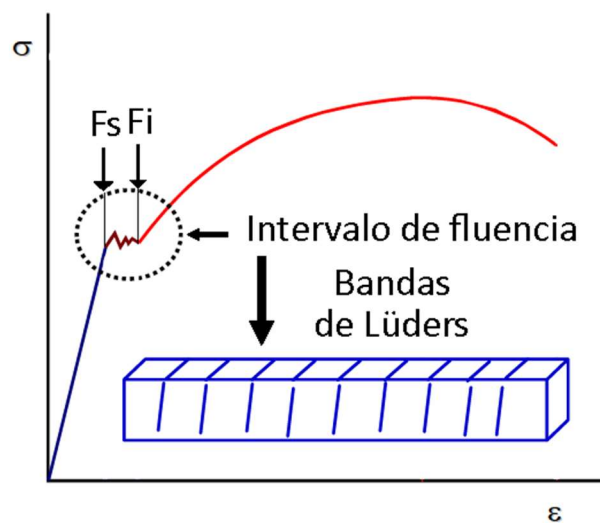


Figura 2.15. Intervalo de fluencia en curva esfuerzo-deformación (Torres Hernández, Y., s.f.) [20].



Figura 2.16. Bandas de Lüders (Montes J.M., Cuevas F.G. y Cintas J., 2014) [3].

Para evitar las bandas de Lüders, la forma de proceder habitualmente es reduciendo la elongación del punto de fluencia, disminuyendo el grosor de la lámina mediante laminado en frío entre un 0,5% y un 1,5% del espesor inicial, pero incluso aplicando dicha disminución de espesor es posible que vuelvan a aparecer las bandas de Lüders unos días después o incluso horas. Esto es debido al proceso denominado envejecimiento tras la deformación, proceso por el cual varían las propiedades de algunas aleaciones sin variar demasiado su microestructura [19]. Por lo que para evitar que reaparezcan de nuevo las bandas, primero hay que evitar el envejecimiento tras la deformación.

De manera esquemática se puede expresar esta característica de la siguiente manera:

- Aceros con bajo contenido en carbono o aleaciones de aluminio → bandas de Lüders → aplicar laminación en frío y evitar envejecimiento tras la deformación.

2.1.2 Anisotropía

Si el material a plegar posee propiedades diferentes según la dirección de doblado, es importante tenerlo en cuenta antes de realizar el plegado. La anisotropía puede ser causada por una deformación plástica previa donde los granos se hayan alargado en una dirección y acortado en otra, repercutiendo en las propiedades del material, mecánicas y físicas.

Sin embargo, la orientación de los granos no es la única causa de la anisotropía del material (anisotropía cristalográfica), también repercute la ubicación de los diferentes tipos de inclusiones e impurezas que puedan existir en el material (fibración mecánica).

En conclusión:

- Tener en cuenta la dirección de doblado, ya que las propiedades del material difieren según la misma.

2.1.3 Tamaño de grano

Si se distinguieran de manera cualitativa dos tamaños de granos, grande y pequeño, se podría decir que materiales con tamaño de grano grande, tienen ductilidad, resistencia y dureza bajas, así como un acabado superficial pobre, mientras que materiales con granos pequeños se asociarían con materiales resistentes. De manera cuantitativa, el ASTM¹ establece una escala de tamaño de grano (tabla 2.2), donde

¹ American Society for Testing and Materials.

se consideran granos finos aquellos con tamaño entre 5 y 8 en la escala de ASTM. El grado de tamaño usado normalmente por la industria para procesos de conformado como el doblado de chapa es 7.

Un efecto bastante conocido y relacionado con el tamaño de grano es el llamado efecto “piel de naranja”, por el cual las láminas metálicas adquieren un acabado superficial rugoso producido por un exceso de crecimiento de los granos del material durante el tratamiento térmico de recocido.

Tabla 2.2. Escala ASTM de tamaños de grano (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].

Tamaños de grano		
No. ASTM	Granos/mm ²	Granos/mm ³
-3	1	0,7
-2	2	2
-1	4	5,6
0	8	16
1	16	45
2	32	128
3	64	360
4	128	1 020
5	256	2 900
6	512	8 200
7	1 204	23 000
8	2 048	65 000
9	4 096	185 000
10	8 200	520 000
11	16 400	1 500 000
12	32 800	4 200 000

2.1.4 Resistencia al mellado de las hojas metálicas

Durante el servicio de numerosas piezas fabricadas con procesos de conformado, estas están sometidas tanto a fuerzas dinámicas como estáticas, aunque principalmente dinámicas como por ejemplo un automóvil. Las fuerzas dinámicas suelen causar melladuras o hendiduras sobre el material que, si no se tratan a tiempo o se reemplaza la pieza, pueden suponer la fractura final de la misma, sobre todo si la pieza entra en contacto con partículas abrasivas que puedan penetrar sobre la hendidura. Un ejemplo de este tipo de hendiduras se puede observar en la figura 2.17, perteneciente a una plaquita de mecanizado.



Figura 2.17. Detalle de una hendidura sobre una plaqueta (Graham, s.f.) [21].

Es conocido que la resistencia al mellado de láminas metálicas aumenta mientras más gruesa sea la lámina, disminuye mientras más alto sea el módulo de Young y la rigidez y aumenta al incrementar el esfuerzo de fluencia de la lámina (tabla 2.3).

Tabla 2.3. Dependencia de resistencia al mellado con diversos parámetros.

Resistencia al mellado		
↑ Aumenta	↑ Espesor	↑ Esfuerzo de fluencia
↓ Disminuye	↑ Módulo de Young	↑ Rigidez

2.2 Ensayos para hojas metálicas

Los ensayos de hojas metálicas, también llamados pruebas de formabilidad, constan de una serie de verificaciones con el objetivo principal de asegurar la resistencia de los materiales estudiados durante los procesos de conformado, sin comprometer la integridad de las láminas de metal con la formación de agrietamientos o cuellos [1].

En este documento se van a detallar dos tipos de ensayos, las pruebas de copa y los diagramas de límites de formado.

2.2.1 Prueba de copa

En esta prueba se sujeta la lámina mediante dos matrices planas y circulares, mientras que se realiza una penetración sobre la hoja con un indentador o punzón redondo, como el de la figura 2.18, hasta que la pieza falla por rotura, instante en el que se mide la profundidad de punzonado. La profundidad del punzonado es el parámetro que mide la ductilidad de las hojas para este ensayo, que, aunque sea una prueba de tipo copa, recibe además el nombre de *prueba Erichsen*, ya que existen diversas variantes de las pruebas de copa, como la prueba Olsen [23]. Un ejemplo de una lámina ensayada con esta prueba se puede apreciar en la figura 2.19.



Figura 2.18. Máquina de ensayo manual Erichsen (Martín Sanz, M.A., 2013) [22].

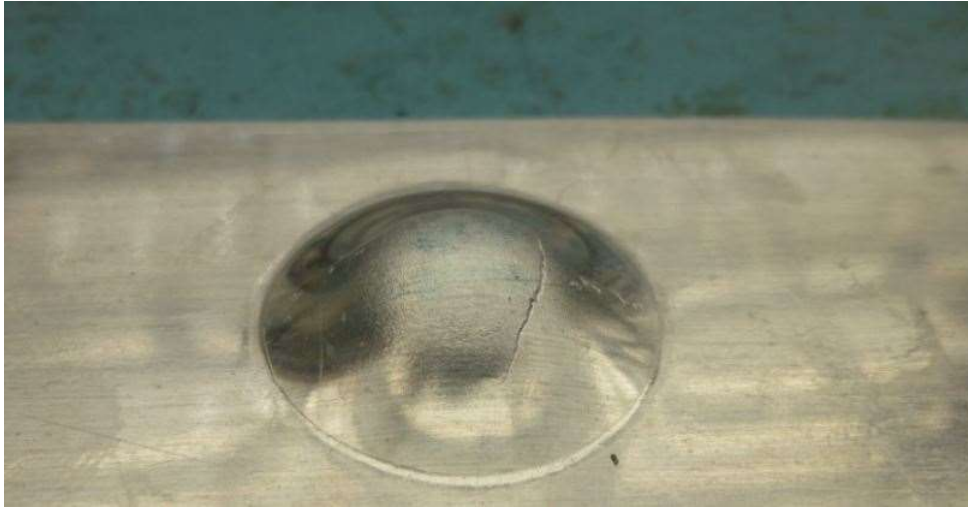


Figura 2.19. Punzonado sobre lámina metálica en ensayo Erichsen (Martín Sanz, M.A., 2013) [22].

Este tipo de pruebas fueron las primeras en desarrollarse para estudiar la ductilidad de las hojas metálicas, destacando por su facilidad de uso, pero no por su capacidad para simular las condiciones reales de conformado, por lo que los resultados arrojados por estas no suelen ser demasiado fiables.

2.2.2 Diagramas de límites de formado

Estos diagramas representan gráficamente la división entre zona segura (la lámina no se fractura) y zona de fallo (figura 2.20), en función de la deformación ingenieril mayor (e_1) y deformación ingenieril menor (e_2), desarrolladas en la ecuación 2.3 según la nomenclatura explicada en la figura 2.21, sufridas por la lámina. Las deformaciones ingenieriles se miden después de haber sido golpeado el material con un punzón, mediante las longitudes de los ejes de las circunferencias deformadas resultantes, previamente dibujadas a partir de algún método fotoquímico como el de la figura 2.22.

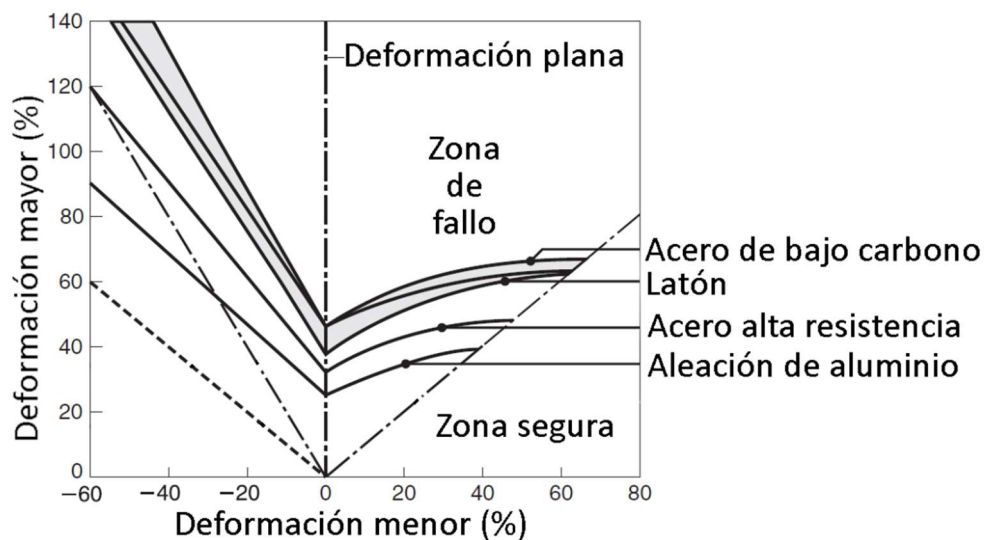


Figura 2.20. Ejemplo de diagrama de límites de formado (Kalpakjian, S y Schmid, S.R., 2008) [1].

$$e_1 [\%] = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100 \quad (2.3)$$

$$e_2 [\%] = \frac{w_f - w_o}{w_o} \times 100$$

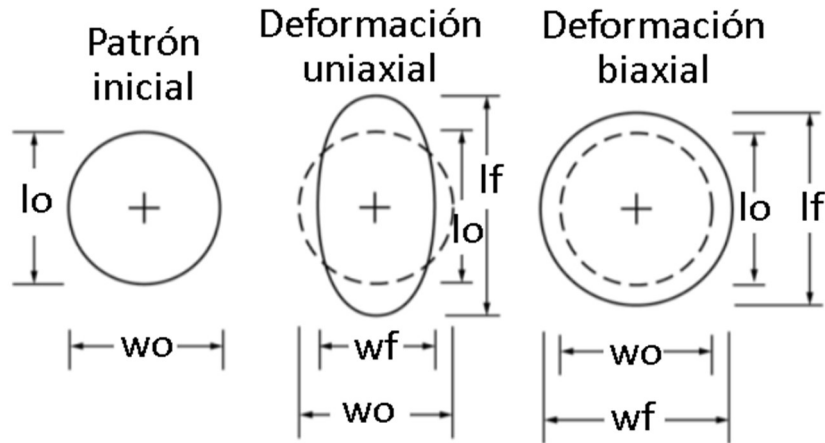


Figura 2.21. Longitudes para el cálculo de deformaciones ingenieriles (ASTM E2218-15., 2015) [24].

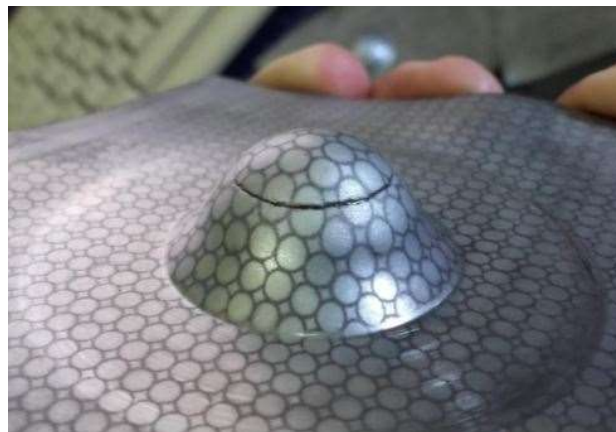


Figura 2.22. Patrón circular para medición de deformaciones ingenieriles (Orlando Tolaba, R., 2017) [25].

El tamaño de los círculos debe hacerse lo más pequeño posible, para así poder apreciar mejor la deformación de los círculos y realizar con mayor exactitud los diagramas de límites de formado.

Para realizar los diagramas se ensayan diferentes probetas de un mismo material, pero de espesores distintos, anotando el valor de los ejes de las circunferencias distorsionadas que se forman tras la deformación. El eje mayor de la elipse representa la dirección donde se ha producido la tracción del material, siendo esta siempre positiva. Por otra parte, el eje menor de la elipse representa la magnitud de tracción o compresión, ya que esta deformación menor puede ser positiva o negativa.

Comparando dos tipos de diagramas de límite de formado para dos materiales diferentes, o iguales pero ensayados en condiciones distintas, mientras más elevada sea la curva de dicho diagrama, mayor es la conformabilidad del material. Esto se debe a que en el caso que el diagrama sea más alto, la zona segura será mayor. El que el diagrama sea de un tipo u otro depende de numerosos factores, no sólo del tipo de material y sus propiedades, sino también de las condiciones en las que se haya realizado el ensayo, por ejemplo, la lubricación entre el punzón y la hoja metálica, el estado superficial de la lámina,

imperfecciones, rayaduras, etc. Es importante tener todos los factores en cuenta, ya que, si solo analizamos el efecto del punzón sobre el material, probablemente se esté sobrestimando la conformabilidad del material. Una probeta con imperfecciones y rayaduras fallará prematuramente frente a una que no las tenga al realizar el ensayo. Otro ejemplo es la influencia del espesor, mientras más gruesa sea la hoja, teóricamente más elevada será la curva de formabilidad, sin embargo, en la práctica se demuestra que no es así debido a que se agrieta antes la lámina si el grueso es demasiado grande.

Con la realización de los ensayos de punzonado, se puede sacar información más allá de las deformaciones ingenieriles de los círculos. Midiendo las áreas de las elipses después de ensayar y comparándolas con las áreas de los círculos originales, se puede dictaminar si el grosor de la lámina ha cambiado durante el proceso de conformado. Gracias a que, una de las características de los procesos de conformado es que el volumen de material permanece constante, si el área del círculo deformado es mayor que la del círculo sin deformar, eso es indicativo de que la lámina se ha vuelto más fina.

2.3 Parámetros de doblado

En este apartado se van a estudiar los parámetros más importantes que entran en juego a la hora de plegar hojas metálicas, y que, por lo tanto, habrá que tener en cuenta para que la pieza final sea lo más parecida posible al modelo inicial diseñado [1] [17]. Estos parámetros se muestran sobre una probeta en la figura 2.23.

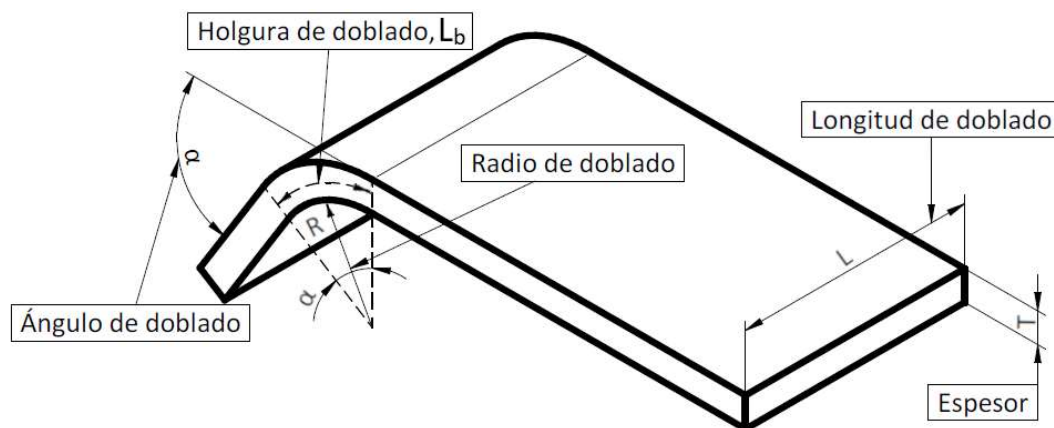


Figura 2.23. Parámetros de doblado.

- Ángulo de doblado (α).
- Espesor de la lámina tras el doblado (T)
- Radio de doblado (R):

El radio de doblado se especifica respecto a la parte interna de la pieza, siendo el mismo determinado por el radio de la herramienta usada para la operación de plegado.

- Holgura o tolerancia de doblado (L_b):

Se define como la longitud del eje neutro en la zona doblada de la pieza. Este parámetro es de gran importancia ya que permite realizar una estimación del estirado que ocurre en la pieza tras el doblado, para de esta manera, hacer coincidir el diseño con la forma final de la pieza. Mientras más pequeño sea el radio de plegado respecto al grosor del material, mayor será el estiramiento de la pieza durante el doblado. Es necesario recalcar el hecho de que, aunque se hable de línea neutra, esta es en realidad un plano continuo a lo largo del espesor del material.

Una primera aproximación de la localización de la línea neutra podría ser el 40 % del espesor del material, medido a partir de la cara de la lámina sometida a compresión durante el doblado [11], aunque se suele considerar en el centro del espesor normalmente si este es suficientemente pequeño.

La línea neutra al no estar sometida a tensiones mantiene constante su longitud, aunque cambien las magnitudes de las tensiones de compresión y tracción a ambos lados de dicha línea, por lo tanto, L_b permanece constante a lo largo del proceso de plegado (figura 2.24) [30].

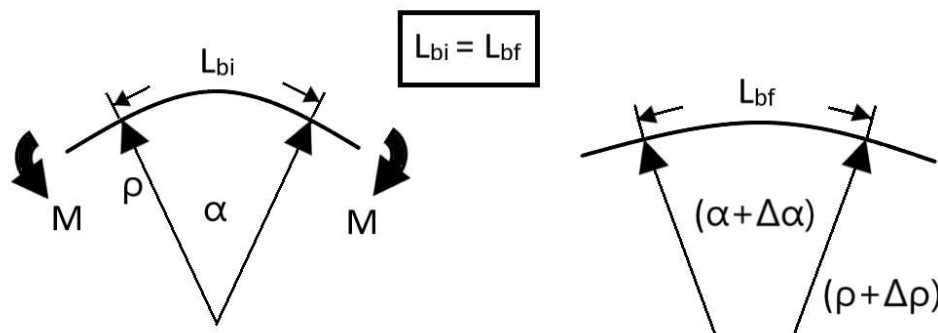


Figura 2.24. Conservación de la longitud de la línea neutra en la zona de plegado.

- Longitud de doblado (L):

Este parámetro se define como la longitud de la lámina en dirección paralela al eje de doblado. El ancho de la lámina no se mantiene constante en toda la pieza durante el plegado. Al doblarse la lámina de metal, debido al efecto Poisson², el ancho en la zona donde se encuentran las fibras a tracción es menor respecto al ancho original, mientras que en las de compresión, el ancho es mayor (ver figura 2.25).



Figura 2.25. Detalle de pieza plegada.

² Efecto Poisson: al aplicar una fuerza de tracción en una dirección sobre una pieza, ésta se alarga en dicha dirección, mientras que se acorta en las otras dos direcciones perpendiculares [26].

2.3.1 Radio mínimo de doblado

El radio de doblado está relacionado con el espesor de la chapa a plegar, de tal manera que, mientras más pequeña sea la relación entre el radio de doblado y el espesor de la chapa ($\frac{R}{T}$), mayor será la deformación de las fibras exteriores a tracción del material, por lo que habrá mayor probabilidad de que la lámina falle por formación de grietas.

Para evitar la formación de grietas, se establece el llamado *radio mínimo de doblado*, radio para el cual aparecen grietas en las fibras exteriores de la hoja. Debido a la relación que tienen entre sí el radio de doblado y el espesor, el *radio mínimo de doblado* se expresa en función del espesor de la pieza, así por ejemplo un *radio mínimo de doblado* de 4T indica que el radio mínimo al cual se puede doblar la chapa sin que aparezcan grietas es de 4 veces el espesor de la chapa, mientras que, si tuviera un valor nulo, ello indicaría que la pieza se puede plegar sobre si misma sin romperse. Como consecuencia, la tensión en el área del material y la capacidad de plegado son inversos.

El *radio mínimo de doblado* se puede aproximar mediante la ecuación 2.4, donde r es la reducción de tensión del área de la lámina metálica, dato que debe ser proporcionado por el fabricante. Esta regla empírica suele funcionar bien para aceros y aluminios, pero sólo es aplicable para reducciones de área menores del 20 % [30]. En la figura 2.26 se encuentran representados diversos resultados experimentales para metales junto al ajuste correspondiente a la ecuación 2.4.

Los valores de radio mínimo de doblado para algunos materiales se encuentran representados en la tabla 2.4, dependiendo estos de la condición y tipo de metal que sea (por ello para cada material se representa un rango de radio mínimo).

$$R_{min} = T \left(\frac{60}{r} - 1 \right) \quad (2.4)$$

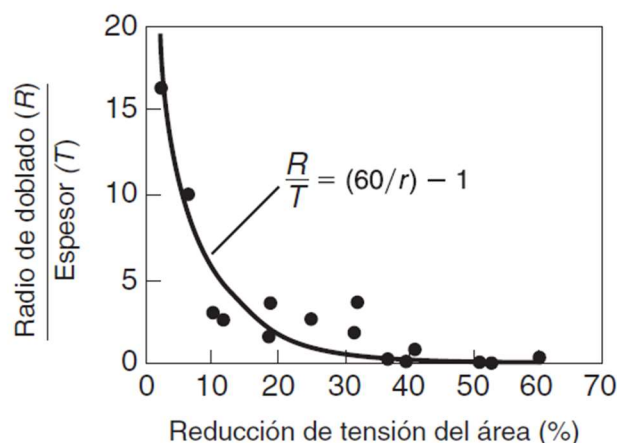


Figura 2.26. Relación entre R/T y la reducción de tensión de área para láminas metálicas (Kalpakjian, S y Schmid, S.R., 2008) [1].

Tabla 2.4. Radio mínimo de doblado para diversos materiales (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].

Radio mínimo de doblado para diversos materiales a temperatura ambiente		
	Condición	
Material	Blando	Duro
Aleaciones de aluminio	0	6T
Cobre berilio	0	4T
Latón (con bajo plomo)	0	2T
Magnesio	5T	13T
Aceros		
Acero inoxidable austenítico	0,5T	6T
Bajo carbono, baja aleación y HSLA	0,5T	4T
Titanio	0,7T	3T
Aleaciones de titanio	2,6T	4T

El radio mínimo de doblado no sólo depende del espesor del material, depende también de otros factores. Una manera de reducir el esfuerzo superficial sobre el material, para así aumentar la reducción de tensión del área del metal, es plegando la pieza a mayor temperatura, teniendo la posibilidad de plegar con un radio de doblado más ajustado. Por otra parte, el radio de plegado también es función del acabado superficial de la lámina, así como de la presencia de inclusiones que son, desde el punto de vista de la rotura del material, concentradores de esfuerzos. Un material con mal acabado superficial y numerosas inclusiones tendrá un mayor radio mínimo de doblado frente a otro con mejor acabado superficial y menor número inclusiones. Las inclusiones con una morfología alargada son más perjudiciales respecto a las esféricas, debido a la anisotropía que ello introduce.

Existen métodos para mejorar el comportamiento del material reduciendo el *radio mínimo de doblado*, como por ejemplo mecanizando o limando la pieza, o realizándole un tratamiento térmico de alivio de tensiones.

Un factor para tener en cuenta a la hora de realizar el plegado es la dirección en la que se encuentran ubicados los granos del material. Doblar en dirección longitudinal a los granos o perpendicular a los mismos cambia el valor del *radio mínimo de doblado*, debido a la anisotropía del material. El *radio mínimo de doblado* es mayor si se realiza el plegado con el eje de doblado en dirección longitudinal con los granos, mientras que realizar el plegado en dirección perpendicular a los granos permite radios de plegado más pequeños (figura 2.27) [27].



Figura 2.27. Influencia de la dirección de los granos en el radio mínimo de plegado (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].

Por último, otro parámetro que afecta al *radio mínimo de doblado* es la dureza del material. Mientras más duro sea el material a plegar, mayor será el *radio mínimo de plegado* y viceversa.

A modo de resumen y para una compresión más clara, se expone una tabla con los parámetros citados anteriormente y su repercusión sobre el *radio mínimo de doblado* (tabla 2.5).

Tabla 2.5. Dependencia de radio mínimo de doblado con diversos parámetros.

Radio mínimo de doblado (R_{min})	
Aumento de temperatura	↓ R_{min}
Mayor dureza del material	↑ R_{min}
Mayor espesor	↑ R_{min}
Mejor acabado superficial	↓ R_{min}
Menores inclusiones	↓ R_{min}
Plegado en dirección longitudinal a granos	↑ R_{min}
Plegado en dirección perpendicular a granos	↓ R_{min}

2.3.2 Recuperación elástica

El proceso de doblado busca producir un cambio permanente en la geometría del metal. Para ello se tiene que alcanzar la zona plástica del diagrama tensión-deformación, ya que, si no es el caso, la pieza recuperará su forma original. Si se ejerce una fuerza pequeña sobre la lámina durante el plegado comparado con el límite elástico del material, tras retirar la carga la pieza volverá a su estado original. Para poder deformar plásticamente el material es necesario superar un cierto umbral de fuerza, pero incluso superando dicho valor de fuerza, quedan remanentes en el material zonas elásticas que no plastifican. La fuerza ejercida sobre la hoja deforma plásticamente el exterior de la lámina mientras que en el interior no se alcanza el límite elástico, razón por la cual esa parte interior del material tiende a recuperar su forma original antes del plegado [1] [11] [17].

La línea neutra, que en realidad es un plano a lo largo del material, es importante en el entendimiento de la recuperación elástica. Las fuerzas actuantes sobre dicha línea son cero, incrementándose las mismas a medida que aumenta la distancia relativa a la línea neutra. No es hasta una cierta distancia de esta línea en ambas direcciones, cuando se alcanza el umbral de fuerza al cual el material plastifica. Dicho umbral divide el material en dos zonas, una elástica y otra plástica. La región entre los umbrales en ambos sentidos y la línea neutra forman el llamado *núcleo elástico* (figura 2.28), siendo esta zona deformada sólo elásticamente, ya que no se alcanza la fuerza necesaria para que plastifique y, por lo tanto, siendo la misma la responsable de la recuperación elástica o *springback*.

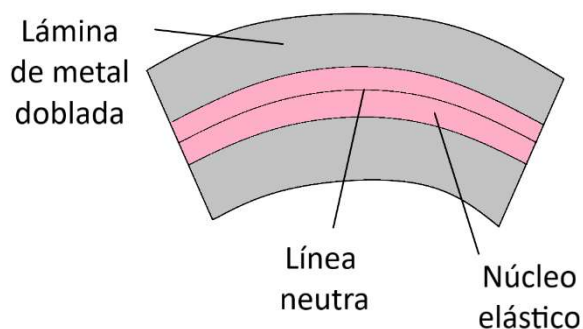


Figura 2.28. Núcleo elástico de una lámina de metal (Sheet Metal Bending, s.f.) [11].

Después de finalizar el proceso de doblado, cuando se retira la carga, la recuperación del *núcleo elástico* provoca el springback, volviendo parcialmente el material a su estado original, debido a que el ángulo final de doblado es menor con respecto al que se plegó, y el radio final de doblado es mayor en relación con el radio inicial. La diferencia entre la lámina antes y después de la recuperación elástica es de apenas unos grados, pero los suficientes como para no poder aceptar la pieza conformada como válida, por lo que es necesario estudiar el fenómeno de restitución elástica, para de esta manera, obtener exactamente la pieza deseada.

2.3.2.1 Cálculo del desarrollo de una pieza plegada

Si el espesor de la lámina es suficientemente pequeño, la línea neutra se puede suponer en la mitad del espesor de esta, en cualquier otro caso se suele encontrar más cerca del radio interior del plegado que del exterior. Sin embargo, la posición de la línea neutra no solo depende del espesor del material, también es función del radio de plegado, entre otros factores, siendo los dos anteriores los más importantes.

El cálculo de la posición de la línea neutra permite, conociendo la geometría final de la pieza que se quiera obtener, calcular la longitud de la pieza de partida (L_0), o sea el desarrollo del elemento doblado (figura 2.29).

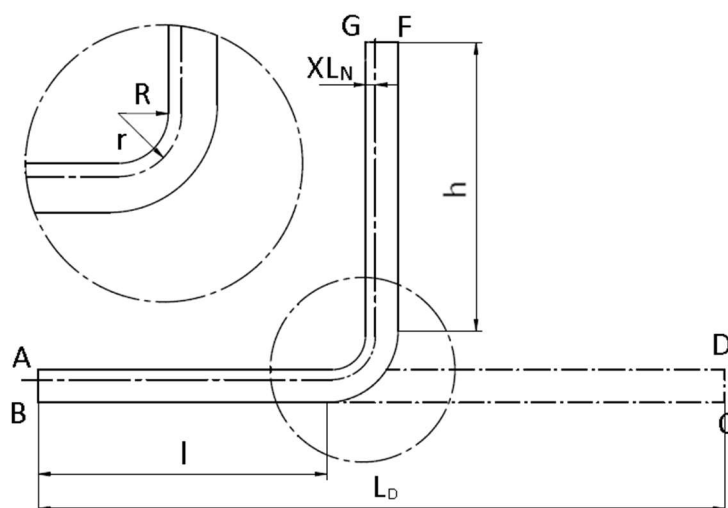


Figura 2.29. Lámina después de doblado para el cálculo de su desarrollo.

Se va a presentar varias maneras de calcular el desarrollo de una pieza plegada, donde algunas de las cuales va a necesitar el cálculo previo de la línea neutra. Es importante destacar que todos los desarrollos y valores numéricos son de aplicación para piezas prismáticas de acero dobladas a 90° de sección rectangular [55].

Cálculo de la posición de la línea neutra (XL_N)

Conociendo el cociente entre el radio de doblado y el espesor del material, R_i/T , se puede entrar en la tabla 2.6, y obtener el factor ψ , factor por el cual habría que multiplicar el espesor T para obtener la posición de la fibra neutra desde el interior del radio de curvatura (figura 2.30).

Tabla 2.6. Valores de ψ para el cálculo de la línea neutra.

R_i/T	ψ
0,2	0,347
0,5	0,387
1	0,421
2	0,451
3	0,465
4	0,470
5	0,478
10	0,487

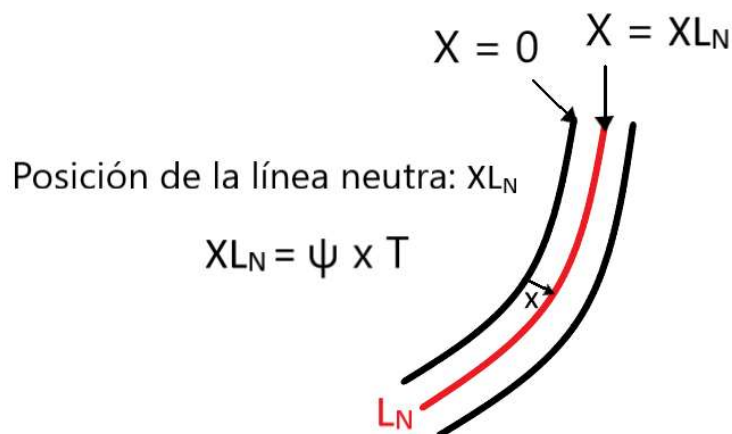


Figura 2.30. Referencia para el cálculo de la posición de la línea neutra.

Cálculo de L_D de forma aproximada

Con este método es necesario calcular tanto la longitud como la posición de la línea neutra, siendo indispensable para este último el valor del espesor del material. Para acero, existe una expresión general en función del radio interior de doblado y del espesor del material (fórmula 2.5), así como algunas recomendaciones para determinados espesores (tabla 2.7). Si la pieza es lo suficientemente fina ($T \leq 2$ mm), se puede considerar que la línea neutra coincide con la línea media del material, ya en este caso se puede suponer que el espesor del material doblado permanece constante. Sin embargo, para mayores

espesores ello no es posible debido a la importante reducción de espesor que se produce en el radio de doblado.

Una vez conocida la posición de la línea neutra, para calcular la longitud de la pieza inicial que se tendría que doblar, bastaría con obtener la longitud de la línea neutra en la posición calculada abatiendo posteriormente la cara doblada sobre el mismo plano que la cara sin doblar.

$$XL_N = \frac{T}{3} \sqrt[4]{\frac{R}{T}} \quad (2.5)$$

Tabla 2.7. Recomendaciones sobre la posición de la línea neutra para láminas de acero plegadas a 90°.

Posición de la línea neutra	
$XL_N = \frac{1}{2}T$	$T \leq 2 \text{ mm}$
$XL_N = \frac{3}{7}T$	$2 \text{ mm} < T \leq 4 \text{ mm}$
$XL_N = \frac{1}{3}T$	$T > 4 \text{ mm}$

Cálculo de L_D de manera experimental

Se deben tomar medidas de la pieza doblada para, mediante desarrollos geométricos, obtener el valor de L_D de manera experimental.

Para realizar los cálculos, primero tiene que ensayarse una pieza como la de la figura 2.29, plegándola con el radio interior R, obteniendo la pieza final ABGF. Para calcular L_D , tomando las medidas necesarias de la pieza plegada (l, h, R y T de la figura 2.29), se pueden utilizar la expresión 2.6, donde r es el radio interno de la pieza (R) más la posición de línea de desarrollo (XL_N) (ecuación 2.7).

$$L_D = l + \frac{2\pi r}{4} + h \quad (2.6)$$

$$r = R + XL_N \quad (2.7)$$

Si se tiene como dato la longitud de la pieza sin doblar y se desea calcular la posición de la línea de desarrollo (XL_N), se puede utilizar la expresión 2.8.

$$XL_N = \frac{2(L_D - l - h)}{\pi} - R \quad (2.8)$$

Cálculo de L_D mediante tablas

Existe una manera más rigurosa de calcular L_D , teniendo en cuenta más parámetros que en los casos anteriores. Además del espesor de pieza T, y del radio interior de doblado, con este método se tienen en consideración propiedades mecánicas del material. La expresión que se va a usar para este método es la

2.9, donde a y b son las cotas mostradas en la figura 2.31, y K_1 y K_2 son factores que dependen del espesor de la chapa y del radio interior de doblado, así como del % de alargamiento de material hasta rotura respectivamente. Los valores K_1 y K_2 se pueden obtener de la tabla 2.8.

$$L_D = a + b + K_1 + K_2 \quad (2.9)$$

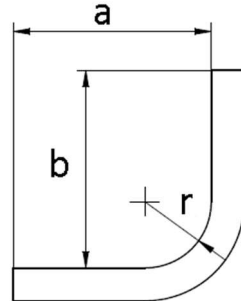


Figura 2.31. Parámetros para el cálculo de L_D según la expresión 2.9.

Tabla 2.8. Coeficientes K_1 y K_2 .

Coeficiente K_1										
$\begin{matrix} T \\ R \end{matrix}$	0,40	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50
4,50	-1,770	-1,664	-1,275	-0,720	-0,308	-0,178	+0,112	+0,376	+0,639	+0,900
4,00	-1,570	-1,452	-1,060	-0,543	-0,132	-0,040	+0,287	+0,548	+0,804	+1,058
3,50	-1,358	-1,240	-0,845	-0,366	-0,006	+0,222	+0,462	+0,720	+0,968	+1,206
3,00	-1,146	-1,028	-0,630	-0,189	+0,170	+0,404	+0,636	+0,893	+1,132	+1,364
2,50	-0,935	-0,816	-0,415	-0,012	+0,346	+0,586	+0,811	+1,065	+1,296	+1,522
2,00	-0,724	-0,604	-0,200	+0,165	+0,522	+0,768	+0,986	+1,237	+1,460	+1,680
1,75	-0,618	-0,498	-0,107	+0,254	+0,610	+0,859	+1,073	+1,323	+1,542	+1,759
1,50	-0,513	-0,392	+0,015	+0,343	+0,698	+0,950	+1,161	+1,409	+1,624	+1,838
1,25	-0,407	-0,355	+0,123	+0,432	+0,786	+1,041	+1,248	+1,495	+1,706	+1,917
1,00	-0,302	-0,180	+0,230	+0,521	+0,874	+1,132	+1,336	+1,581	+1,788	+1,996
0,75	-0,196	-0,074	+0,338	+0,610	+0,962	+1,223	+1,423	+1,667	+1,870	+2,065
0,50	-0,090	+0,022	+0,445	+0,699	+1,050	+1,314	+1,510	+1,754	+1,052	+2,154
0,25	+0,016	+0,128	+0,552	+0,788	+1,138	+1,405	+1,598	+1,839	+2,934	+2,233
0,00	+0,010	+0,200	+0,560	+0,860	+1,140	+1,401	+1,650	+1,940	+2,160	+2,420
Coeficiente K_2										
% alargamiento	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
K_1 positivo	1,2	1,15	1,1	1,05	1	0,95	0,9	0,85	0,8	
K_1 negativo	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2	

Cálculo de L_D mediante desarrollo y tabla

Realizando diversos desarrollos geométricos con los parámetros de la figura 2.32 para una pieza prismática de sección rectangular doblada a 90°, se puede obtener la expresión 2.10, donde K se obtiene mediante la tabla 2.9 en función del espesor de la pieza (hasta 4 mm).

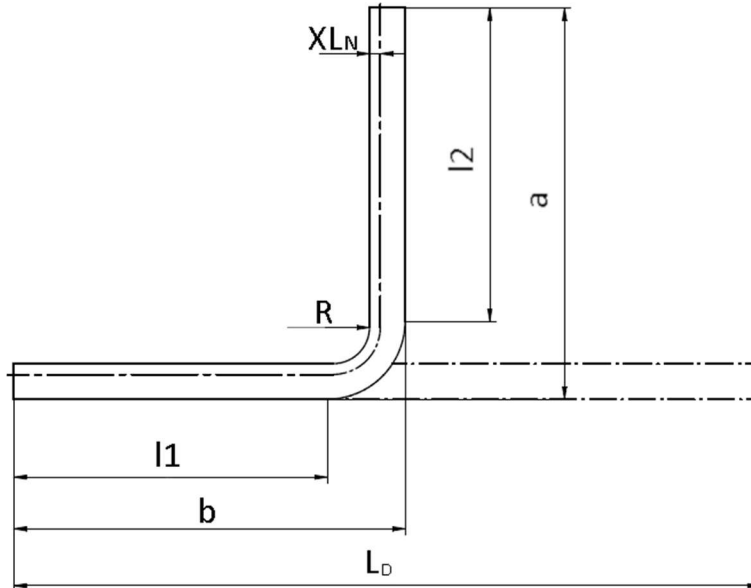


Figura 2.32. Parámetros para ecuación 2.10.

$$L_D = a + b - K \quad (2.10)$$

Tabla 2.9. Valores de K para la ecuación 2.10.

Valor de K en el doblado de chapas a 90° de hasta 4 mm de espesor								
T [mm]	R [mm]							
	0,2T	0,5T	1T	2T	3T	4T	5T	10T
0,5	0,77	0,80	0,88	1,07	1,28	1,49	1,70	2,76
0,8	1,23	1,28	1,41	1,72	2,04	2,38	2,72	4,42
1	1,54	1,60	1,77	2,15	2,56	2,98	3,40	5,53
1,2	1,84	1,92	2,12	2,58	3,07	3,57	4,08	6,63
1,5	2,31	2,40	2,65	3,22	3,84	4,47	5,10	8,29
2	3,08	3,20	3,53	4,30	5,12	5,96	6,80	11,06
2,5	3,85	4,00	4,42	5,37	6,40	7,45	8,50	13,82
3	4,62	4,80	5,30	6,45	7,68	8,94	10,20	16,59
3,5	5,39	5,60	6,19	7,52	8,96	10,43	12,90	19,35
4	6,16	6,40	7,07	8,60	10,24	11,92	13,60	22,12

Introduciendo 2.11, 2.12 y 2.13 en 2.14 se obtiene la expresión 2.10.

$$a = l_2 + (R + T) \quad (2.11)$$

$$b = l_1 + (R + T) \quad (2.12)$$

$$K = 2(R + T) - \frac{\pi(R + XL_N)}{2} \quad (2.13)$$

$$L_D = l_1 + (R + T) + l_2 + (R + T) - 2(R + T) + \frac{\pi(R + XL_N)}{2} \quad (2.14)$$

2.3.2.2 Expresiones para el cálculo de la recuperación elástica

Kalpakjian y Schmid, en su libro [1] introducen una expresión (ecuación 2.15) original de Gardiner [46] para el cálculo del radio final de doblado después de retirar la carga, como se puede ver en la figura 2.33, donde R_f depende de parámetros tales como el radio del punzón usado R_i , el módulo de Young E , el límite elástico Y y el espesor T del material.

Una vez calculado el radio de doblado final, para poder analizar la recuperación elástica es necesario pasar de radio de curvatura a ángulo de doblado. Para ello, es vital recordar una de las características de la holgura de doblado L_b , su longitud permanece constante durante el plegado, como muestra la ecuación 2.16. Esta característica permite calcular, conocido el ángulo inicial y los radios iniciales y finales de curvatura, el ángulo final de doblado tras la recuperación elástica (ecuación 2.17).

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i Y}{ET} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i Y}{ET} \right) + 1 \quad (2.15)$$

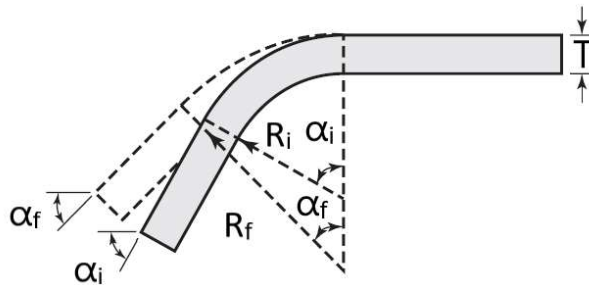


Figura 2.33. Restitución elástica tras el doblado (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].

$$L_{bi} = \alpha_i R_i = L_{bf} = \alpha_f R_f \quad (2.16)$$

$$\alpha_f = \frac{\alpha_i R_i}{R_f} \quad (2.17)$$

Estudiando la fórmula 2.15, se puede observar como la restitución elástica aumenta al incrementarse el cociente de R_i/T y el límite elástico del material, y al disminuir el módulo de Young del metal.

Existen otras tantas expresiones para el cálculo de la restitución elástica, alguna de las cuales a parte de la ecuación 2.15 van a ser presentadas en este apartado.

Vidal, en su Trabajo de Fin de Grado [45] proporciona una expresión mostrada en la ecuación 2.18 para el cálculo de la recuperación elástica que tiene en cuenta diversos parámetros, principalmente relativos a las características del material, como K y n, coeficiente de resistencia y exponente de endurecimiento por deformación respectivamente, o E' , que es el módulo de Young corregido del material debido a la hipótesis de deformación plana del material (ecuación 2.19).

$$\left(\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_f}\right) = \frac{48K}{\sqrt{3}T^3 E'} \left(\frac{2}{\sqrt{3}R_i}\right)^n \frac{\left(\frac{T}{2}\right)^{n+2}}{n+2} \quad (2.18)$$

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (2.19)$$

La ecuación 2.18 supone que el material se endurece con la deformación, modelo que se asemeja al comportamiento de materiales deformados en frío, siendo este comportamiento del material descrito por la ecuación de Hollomon (ecuación 2.1). Por otra parte, se realiza la hipótesis de deformación plana debido a que la deformación durante el plegado solo ocurre en el eje de doblado, con lo que la hipótesis se asemeja a la realidad. Así mismo se supone que el volumen del material permanece constante a lo largo del doblado, característica típica de los procesos de conformado. Por último, otra de las suposiciones realizadas en la ecuación 2.18, es que el espesor de la lámina es muy pequeño comparado con las otras dos dimensiones del material.

Una vez calculado el radio final de plegado R_f , mediante la hipótesis de conservación de la holgura de doblado de la ecuación 2.17, se obtendría el ángulo final de doblado.

La última expresión para el cálculo de la recuperación elástica que se va a mostrar es una ecuación proporcionada originalmente por Marciniak [47] (ecuación 2.20), indicando esta expresión que la recuperación elástica es proporcional a:

- La relación entre la tensión de fluencia y el límite elástico corregido.
- El ratio de doblado ρ/T , donde ρ es el radio de curvatura de la línea neutra.
- El ángulo de doblado α .

$$\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_f = 3 \left(\frac{S}{E'}\right) \left(\frac{\rho}{T}\right) \alpha_i \quad (2.20)$$

En la expresión 2.20, respecto a las dos anteriores, se introducen dos nuevos parámetros, ρ : radio de curvatura de la línea neutra y S : tensión de fluencia del material.

Las hipótesis que se realizan para llegar hasta la expresión 2.20 son las siguientes [47]:

- $\rho \gg T$ (radio de curvatura mayor de 3 o 4 veces el espesor de la lámina a conformar). Esto permite suponer que una sección plana normal del material permanecerá igual tras el doblado.

- No existen deformaciones longitudinales a la lámina, por lo que se puede asumir que la línea neutra permanece indeformada tras el doblado, coincidiendo con la línea media del material.
- Comportamiento del material elasto-plástico perfecto (figura 2.34).
- Material isótropo y con deformación plana.

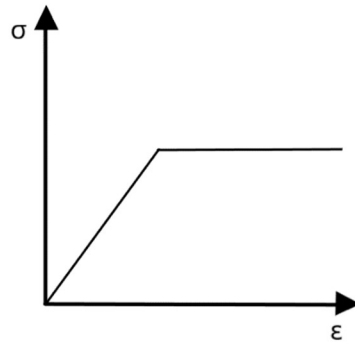


Figura 2.34. Comportamiento elasto-plástico perfecto.

El radio de curvatura de la línea neutra se puede calcular mediante la expresión 2.21, donde R_i es el radio inicial de doblado, o sea el de la matriz, T es el espesor del material y λ es un valor que depende del ratio R_i/T , de acuerdo con la tabla 2.10. En el caso en que dicho ratio sea mayor de 4, la línea neutra coincidirá con la línea media al valer λ 0,5, siendo por lo tanto este valor de λ el que habría que usar de acuerdo con las hipótesis realizadas para el cálculo de la ecuación 2.20.

$$\rho = R_i + \lambda T \quad (2.21)$$

Tabla 2.10. Valores de λ para el cálculo del radio de curvatura de la línea neutra.

λ en función de $\frac{R_i}{T}$	λ
$\frac{R_i}{T} < 0,2$	0,33
$0,2 \leq \frac{R_i}{T} \leq 4$	0,42
$\frac{R_i}{T} > 4$	0,50

2.3.2.3 Métodos para reducir la recuperación elástica

Debido a la importancia de este efecto sobre la industria de la fabricación, se han realizado diversas investigaciones con el propósito de encontrar soluciones a la recuperación elástica a posteriori, ya que no es posible eliminarla desde el principio. Algunos de los métodos para mitigar la recuperación elástica son el sobredoblado, el fondeado y el doblado con estiramiento.

- Sobredoblado:

Es el método usado con más frecuencia en la industria. Primero se calculan cuántos grados de recuperación elástica provocará el doblado sobre la pieza para realizar el diseño de un punzón con un

ángulo de doblado y radio menores que el deseado. La idea de este método es que se pliegue más de lo necesario la lámina, calculándolo de tal manera que cuando se doble el metal y se produzca la recuperación, la hoja quede como se deseaba. Es posible que, a pesar de realizar los cálculos previos, se necesiten varias iteraciones hasta que la pieza adquiera el ángulo deseado final.

- Fondeado:

El fondeado consiste en deformar plásticamente el material en la región de doblado mediante la aplicación de fuerzas localizadas adicionales de compresión entre el punzón y la matriz. De esta manera, el *núcleo elástico* se somete a la suficiente fuerza como para plastificar y que no se produzca la recuperación elástica.

El fondeado se lleva a cabo después de haber plegado la pieza, distinguiendo tres etapas, una de doblado, otra de acuñado y la última de recuperación elástica (figura 2.35, las flechas indican las fuerzas aplicadas sobre la lámina).

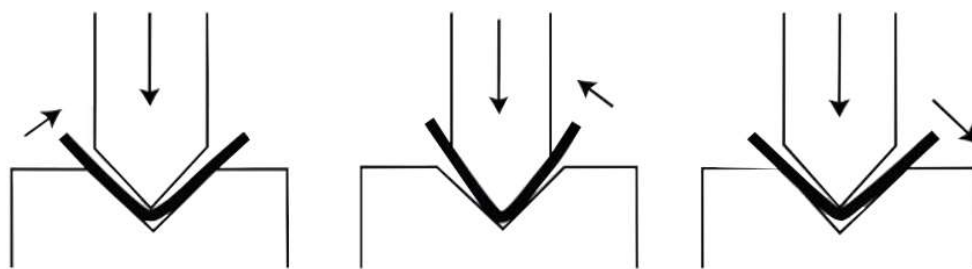


Figura 2.35 Doblado, fondeado y recuperación elástica (CENSA INDUSTRIAL, 2018) [29].

- Estirado:

El proceso de estirado es un método de doblado de láminas, donde, mientras se pliega el material, al mismo tiempo se somete este a tracción sujetándolo por sus extremos mediante dos mordazas, oprimiéndolo mediante una matriz. El lugar donde se aplica la matriz depende del diseño de la máquina de estirado, pudiendo ser arriba de la lámina, abajo o lateralmente. En la figura 2.36 se muestra un ejemplo de estirado donde el punzón se aplica por debajo del material.

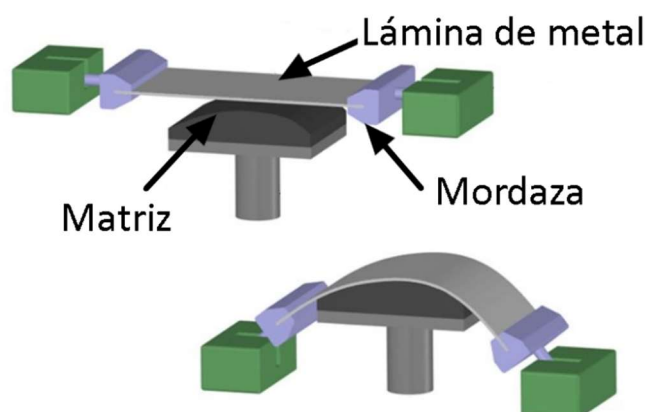


Figura 2.36. Proceso de estirado (Sheet Metal Bending, s.f.) [11].

Utilizando este proceso de doblado, se elimina la mayor parte de la recuperación elástica, debido a que al traccionar el material se consigue plastificar la región del *núcleo elástico*, reduciendo de esta manera el

springback. Sin embargo, es necesario controlar la cantidad de tracción ejercida sobre el material para evitar que la hoja falle por rotura, debido también a que, como consecuencia del efecto Poisson, el material se contrae por los lados al someterlo a tracción.

El estirado es un proceso ampliamente utilizado en el sector de la aeronáutica, por su versatilidad y bajo coste. A pesar de ello, el uso de este proceso carece de sentido para volúmenes de producción altos, y sólo es de aplicación para piezas sencillas y ángulos de doblado no muy agudos.

A continuación, y para finalizar este apartado, se va a presentar una tabla (2.11) de la dependencia de algunos de los parámetros más importantes con el fenómeno de recuperación elástica, donde E es el módulo de Young, Y el límite elástico y T el espesor:

Tabla 2.11. Dependencia de la recuperación elástica con diversos parámetros.

↑ Recuperación elástica			
↓ E	↑ Y	↓ T ³	↓ T ^a

2.3.3 Fuerza de doblado

Según R. Chandramouli [30], la fuerza F requerida para plegar una lámina de espesor T, límite elástico Y, y longitud L⁴ a un ángulo de doblado α con un radio de doblado R, suponiendo que la línea neutra se encuentra en la mitad del espesor de la lámina, se modela según la ecuación 2.22.

$$F = \frac{YLT^2}{2\left(R + \frac{T}{2}\right)} \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.22)$$

Por otra parte, según Kalpakjian [1], la fuerza máxima de doblado, bajo la hipótesis de que el plegado de la lámina se realiza como el de una viga rectangular ideal, tiene la siguiente expresión (2.23):

$$F_{max} = \frac{KYLT^2}{H} \quad (2.23)$$

En la expresión 2.23, K es un parámetro que tiene en cuenta el tipo de proceso de doblado considerado (tabla 2.12), mientras que H es la holgura de la matriz (figura 2.37) dependiendo del proceso de doblado que se esté teniendo en cuenta para el cálculo de fuerza.

³ Manteniendo constante el resto de dimensiones.

⁴ Ver explicaciones de la figura 2.23.

Tabla 2.12. Factores K para el tipo de doblado.

Factor de tipo de doblado: K		
Matriz deslizante	Doblado en U	Doblado en V
K = 0,3	K = 0,7	K = 1,3

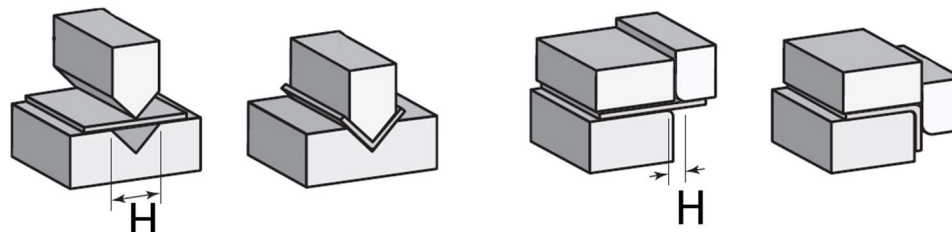


Figura 2.37. Definición de la holgura H según el tipo de doblado (Kalpakjian, S y Schmid, S.R., 2008) [1].

Para el caso de procesos de plegado donde, la holgura de la matriz sea muy grande comparado con el radio de la punta del punzón y/o el espesor de la pieza, como por ejemplo en el caso de doblado en V, se suele utilizar la expresión 2.24 en vez de la ecuación 2.23, donde UTS hace referencia al valor de tensión de rotura del material.

$$F_{max} = \frac{(UTS)LT^2}{H} \quad (2.24)$$

2.4 Tensiones residuales

Las tensiones residuales de un material son aquellas que permanecen a pesar de la ausencia de carga aplicada sobre el material y/o de un gradiente de temperatura. La principal fuente de tensiones residuales suele ser el proceso de fabricación de la pieza, como por ejemplo podría ser el proceso de laminado para la fabricación de láminas de metal. Otros tantos procesos de fabricación que pueden provocar tensiones residuales son fundición, mecanizado, tratamientos térmicos, etc. En definitiva, todo proceso que provoque gradientes de deformación sobre partes localizadas de la pieza puede provocar tensiones residuales [49].

Las tensiones residuales pueden ser beneficiosas o perjudiciales dependiendo de la magnitud de estas, su localización y de si son de tracción o de compresión. Tensiones de compresión pueden demorar el fallo por fatiga mientras que las de tracción pueden acelerarlo [50].

De acuerdo con el artículo realizado por Essa [50] entre otros, al doblar láminas de metal, si se incrementa el ancho de la lámina, se incrementan las tensiones residuales hasta que el ratio ancho-espesor $\left(\frac{W}{T}\right)$ alcanza el valor de 8. Cuando el ancho comienza a ser demasiado elevado respecto al espesor del material, o sea cuando $\frac{W}{T} > 8$, las tensiones residuales comienzan a decrecer a medida que se aumenta el ancho de las láminas. Por lo tanto, las tensiones residuales crecen cuando se aumenta al ancho de la lámina para $\frac{W}{T} \leq 8$, mientras que decrecen para $\frac{W}{T} > 8$.

Para poder obtener una aproximación precisa de la recuperación elástica del material, es necesario conocer el estado tensional del mismo, ya que este influirá en los resultados del ángulo final de doblado.

La influencia de las tensiones residuales en la recuperación elástica depende de la deformación del material al aplicar la carga inicial en el doblado, así como del espesor de la pieza [51].

2.5 Equipos para el formado de láminas de metal

El equipo básico de una máquina de plegado suele constar normalmente de un punzón y una matriz, salvo variantes. Sin embargo, no solo el tipo de matriz y punzón define una máquina de doblado (doblado en U, doblado en V, dado deslizante entre otros) sino también el tipo de bastidor, llegando a imponer algunas características tan importantes como la capacidad de prensado, debido a que los diferentes diseños de bastidores no tienen todos la misma rigidez, y por lo tanto no pueden soportar todos la misma fuerza [1] [17].

Según el tipo de bastidor, de acuerdo con la figura 2.38, se pueden distinguir diferentes tipos de máquinas de doblado. Una de las estructuras más utilizadas por la industria del conformado de metales es el chasis *tipo c*, por su facilidad de acceso tanto para la herramienta como para la pieza de trabajo. Sin embargo, este tipo de bastidor está limitado en capacidad debido a su baja rigidez, característica que corrigen algunos diseños como el de tipo *columnas*. Estos últimos a pesar de tener mayor rigidez, y por ende mayor capacidad de prensado, poseen menor accesibilidad para el operario, por lo que a priori es una desventaja. Sin embargo, debido a la alta automatización y a los avances en robótica, cada vez se necesita menos la actuación del operario, y por lo tanto la baja accesibilidad ya no es un problema. Un ejemplo de máquina de plegado con el chasis tipo *c* se puede observar en la figura 2.39.

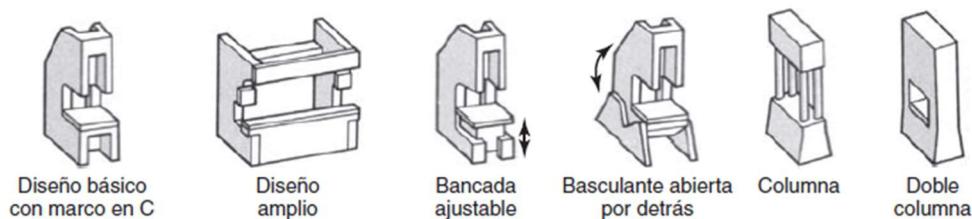


Figura 2.38. Distintos bastidores de máquinas de doblado (Kalpakjian, S y Schmid, S.R.,2008) [1].



Figura 2.39. Máquina de plegado hidráulica de bastidor tipo C, MEBUSA PH90/30S. (SURPLEX, s.f.) [31].

Para realizar la selección de la máquina de doblado adecuada, hay que tener presente diversos factores durante su búsqueda, de tal manera que se optimice el proceso de plegado, minimizando tiempo y costes:

- Naturaleza de la operación de plegado (en V, en U, dado deslizante, etc.)
- Dimensiones y forma, tanto de las matrices y herramientas requeridas, como de piezas a conformar.
- Carrera del punzón, velocidad de operación y tasa de operación por minuto.

- Número de correderas necesarias, dependiendo de las necesidades (una para sujetar y otra para realizar el plegado, por ejemplo).
- Fuerza máxima requerida.
- Tipo de accionamiento (mecánico, hidráulico, neumático), y control (manual o por ordenador).
- Mecanismo de cambio de matrices. Importante para tener en cuenta si se van a realizar productos diferentes en una misma máquina, debido al tiempo necesario para realizar un cambio de matriz.
- Materia de seguridad (homologaciones, conocimientos previos, sistemas de parada automática, posibilidad de automatización para operaciones difíciles y/o peligrosas, etc).

2.6 Consejos prácticos para el plegado de láminas de aluminio

Debido a que el material a ensayar es aluminio, y que se tienen que realizar diversos plegados de probetas, se ha considerado oportuno incluir una serie de consejos prácticos para el plegado de aluminio, que, aunque sea para doblado en V, algunos serán de aplicación para el proceso a realizar.

Estos consejos prácticos han sido proporcionados por CENSA INDUSTRIAL®, empresa mexicana proveedora de insumos industriales [29]:

1. Tener en cuenta el grado de recuperación elástica durante el plegado.

Mientras mayor dureza tenga el aluminio, más acusada será la recuperación elástica.

2. Cuidado con la aparición de arrugas en la línea de plegado.

Revisar que la fuerza necesaria para que el punzón perfora la superficie de la lámina de aluminio excede la fuerza usada durante la operación de doblado. También asegurarse que las especificaciones del material son adecuadas para el radio de doblado a realizar (radio mínimo de plegado). Lo idóneo es una relación 1 a 1 del espesor de la lámina metálica con respecto al radio de plegado interior.

3. Usar punzones con radio de punta parecidos al espesor del aluminio.

Reducir en la medida de lo posible el uso de punzones con puntas pequeñas comparadas con el espesor del material.

4. Estar atento a la posible fractura del aluminio.

Mientras más parecidos sean el radio de plegado, el espesor del material y el radio del punzón entre sí, menor será la probabilidad de que se produzca la fractura de la lámina de aluminio.

5. No doblar a fondo una pieza de aluminio cuya recuperación elástica sea mayor de dos grados.

Como se vio anteriormente, el fondeado es una de las distintas opciones para evitar la recuperación elástica, pero no puede usarse tanto como se quiera. Por ejemplo, si se desea doblar a 90°, y se tiene una recuperación elástica de 2°, se puede usar el fondeado plegando con un punzón a 88°, para que tras la restitución elástica se obtenga finalmente la pieza a 90°. Si embargo, si se usa un ángulo de punzón menor, puede que tras la recuperación elástica no se obtenga el ángulo de plegado deseado.

6. Tener en cuenta la holgura angular entre matriz y punzón para la recuperación elástica.

En el doblado a fondo, se trata de hacer coincidir la holgura angular entre matriz y punzón con los grados de recuperación elástica.

7. Seleccionar una holgura de matriz adecuada para la operación.

Cuando la relación es 1 a 1 entre el radio de doblado y el espesor del material, la holgura perfecta para doblado en V de aluminio se determina mediante la fórmula 2.25, donde T es el espesor de la lámina en mm:

$$H = 2 \times T \times 3,429435 \quad (2.25)$$

Incluso si la relación entre el radio de plegado y el espesor del material no es 1, se usa la ecuación 2.25 para determinar la holgura necesaria.

8. Realizar una correcta configuración de la prensa plegadora.

Hay que asegurarse de que toda la maquinaria haya sido previamente limpiada, que el punzón y el dado estén centrados y que en general no se observen deficiencias en la máquina.

Antes de realizar el plegado, se debe acercar el punzón sin ejercer presión sobre la lámina, hasta que hagan contacto ambas, momento en el cual se puede comenzar a ejercer fuerza.

En este capítulo se presentan las características de la máquina de doblado que se empleará en los ensayos, así como la preparación y caracterización de las probetas usadas. Se describe todo el proceso de fabricación de las probetas y acondicionamiento de la máquina, el proceso de ejecución de los ensayos, así como las mediciones realizadas y equipos empleados para ello.

3.1 Máquina de doblado DISMA TRIS

La máquina de doblado utilizada en los ensayos se muestra en la figura 3.40. Es una máquina de forja ornamental, tanto para el pliegue y curvatura de láminas, como para curvatura de espirales y tubos. El fabricante proporcionaba originalmente con la herramienta diversos utillajes para poder realizar todas las tareas mencionadas anteriormente. Sin embargo, la máquina adquirida de segunda mano sólo contaba con el utillaje necesario para el pliegue de láminas, el básico para poder ensayar las probetas tal y como fue comentado en los objetivos.



Figura 3.40. Máquina de plegado DISMA TRIS.

Tras haber estudiado distintos tipos de máquinas de doblado, la usada para los ensayos se podría clasificar como una máquina de dado deslizante rotatorio, ajustable a distintos ángulos de plegado gracias a su brazo con un grado de libertad de giro en el plano horizontal al plato, y a su tope ajustable para conseguir el ángulo deseado. Los componentes de la máquina se muestran en la figura 3.41. Otra característica de personalización que permite esta herramienta es el ajuste de la holgura entre la matriz de doblado y el dado deslizante (figura 3.42), a partir de la regulación de un utillaje fabricado para la máquina no proporcionado por el fabricante, siendo nula la holgura de serie. El proceso de fabricación de este utillaje y su funcionamiento, se explicarán más adelante. El dado deslizante de la herramienta permite ajustar la distancia entre el material y la matriz de apoyo del dado deslizante, apretándose al brazo giratorio mediante un tornillo.

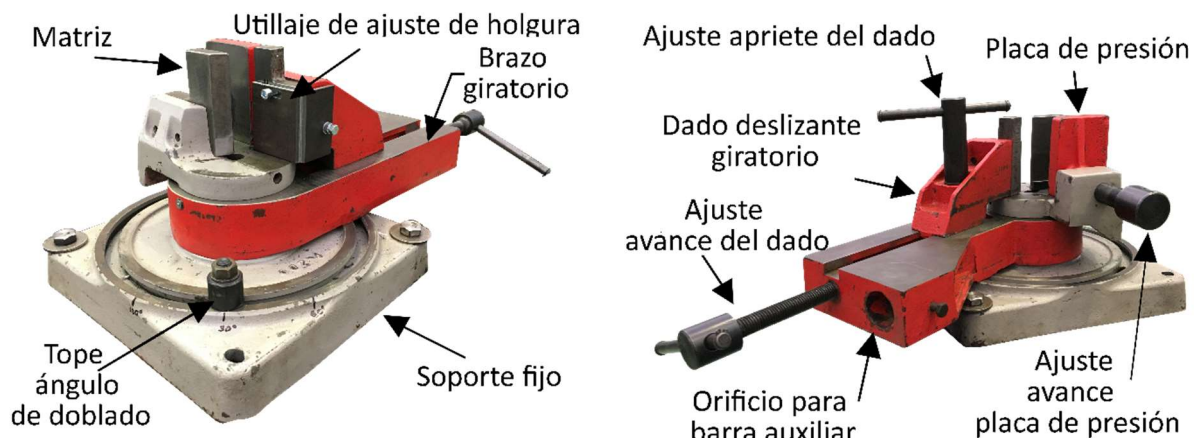


Figura 3.41. Componentes de la máquina de plegado DISMA TRIS.

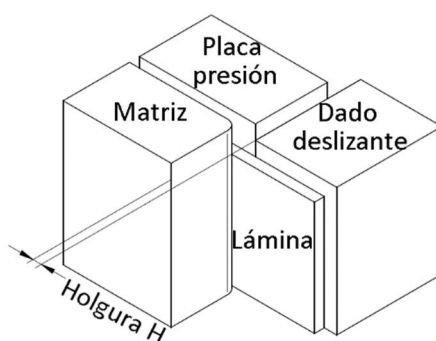






Figura 3.42. Holgura en doblado con dado deslizante.

Para la correcta sujeción de la lámina de metal sobre la matriz, la máquina de doblado consta de una placa de presión regulable mediante un tornillo.

En principio esta máquina plegadora está pensada para el trabajo ornamental de hierro. Sin embargo, el material disponible para las probetas es aluminio, por lo que en un principio no sería válida esta herramienta. A pesar de ello, el aluminio tiene menor límite elástico que el hierro, por lo que es factible el conformado de láminas de aluminio en vez de hierro, incluso de mayores secciones que las mostradas en el catálogo como las máximas posibles.

Por otra parte, la empresa DISMA con su máquina, brinda la oportunidad de realizar mayor fuerza sobre la pieza para espesores y/o materiales más complicados de conformar, a través de una barra acoplada y atornillada sobre el chasis, para de esta manera, ejercer mayor momento de forma manual (existe una variante de esta máquina motorizada, pero no es el caso). En la tabla 3.13 se muestra información del catálogo DISMA, sobre las dimensiones máximas de las secciones. Para el plegado manual de chapas de secciones rectangulares, las dimensiones máximas serían de 100 x 6 mm

Tabla 3.13. Secciones máximas de materiales plegables (DISMA, s.f.) [32].

	Sección de plegado	
	El radio mínimo de plegado es de 1,5 veces el espesor del materia a plegar.	
	Manual	Motor
	100 x 6 mm	100 x 8 mm
	16 mm	20 mm
	16 mm	20 mm


3.2 Acondicionamiento de la máquina de doblado

En primer lugar, se desarmó por completo la máquina, para así poder eliminar cualquier resto de suciedad con disolvente y apreciar con mayor detalle posibles desperfectos que pudieran interferir en el correcto funcionamiento de la máquina de plegado (figura 3.43).



a)



b)



c)

Figura 3.43. Desmontaje de la máquina DISMA TRIS.

Una vez limpiada y desengrasada la máquina, se procedió posteriormente a su reubicación en un lugar adecuado, preferiblemente un lugar lo suficientemente alto para poder realizar los doblados de manera cómoda. A su vez se apoyó la herramienta sobre una base pesada sobre la cual se atornillaría la misma para asegurar que la máquina no se movería durante la operación de doblado, en caso de aplicar grandes fuerzas. Debajo de la base, en sus 4 esquinas se colocaron 4 tacos de goma para absorber posibles vibraciones y evitar alteraciones del doblado.

Para la sujeción de la herramienta a la base mediante tornillos, se realizaron 4 taladros sobre la base giratoria de 14,5 mm cada uno (figura 3.44). Los tornillos se fabricaron a partir de barras roscadas del mismo diámetro.



Figura 3.44. Taladradora vertical.

Al realizar el montaje sobre la base mediante sargentos y las uniones atornilladas, el conjunto quedaba correctamente anclado, sin embargo, a la hora de mover el brazo giratorio de la máquina de plegado, la herramienta interfería con uno de los tornillos de sujeción, por lo que se tuvo que tomar la decisión de soldar y cortar la parte sobresaliente de los tornillos para poder operar adecuadamente. Tras soldar los tornillos, se mecanizaron las cabezas de estos para aplanar su superficie (figura 3.45).



a)



b)

Figura 3.45. Proceso de soldadura de tornillos (a) y máquina de torneado (b).

Finalmente, antes de poder usar la máquina de nuevo, se engrasó todas las partes móviles que habían sido previamente limpiadas con disolvente. El resultado tras el proceso anterior es el de la figura 3.46.



Figura 3.46. Estado final de la máquina de doblado tras su limpieza y posicionamiento.

Tras realizar el desmontaje de la máquina DISMA, se pudo obtener mayor detalle del estado real en el que se encontraba la herramienta. Uno de los principales defectos, ya que afectaba directamente al funcionamiento de esta, era las hendiduras de la matriz de doblado en la parte inferior del radio de curvatura (figura 3.47).



Figura 3.47. Hendiduras sobre el radio de curvatura de la matriz.

Se barajaron distintas opciones para realizar el arreglo de la matriz. Una de las opciones pasaba por producir una nueva matriz a partir de un bloque macizo de metal, mientras que la otra consistía en arreglar la matriz original de la herramienta. Producir una nueva matriz desde cero era una opción bastante difícil y cara, ya que no solo habría que conseguir el material adecuado, sino la herramienta correcta para mecanizar, y los medios necesarios para realizar un tratamiento térmico. Al final del documento se incluyen los planos de las matrices de 3 y 4 mm de radio de doblado que se diseñaron con la idea de fabricar dos matrices desde cero, opción finalmente desechada por la falta de medios y la dificultad que ello suponía.

La segunda opción, arreglar la matriz, fue la escogida debido a los contras de la primera, aunque esta tampoco estaba exenta de problemas. Los desperfectos de la matriz eran de tal envergadura que fue necesario rectificarla a una profundidad de 0,7 mm para eliminar gran parte de la hendidura, como se puede apreciar en la figura 3.48 a), consiguiendo a su vez un acabado uniforme en la superficie. Sin embargo, el proceso de rectificado no fue suficiente para el correcto acondicionamiento de la matriz. Se limó parte de la rebaba aún sobrante de la hendidura para posteriormente mecanizar la matriz produciendo un radio de doblado de esta de 3 mm, con un cabezal de acero rápido (HSS) del mismo radio (figura 3.48 b). El resultado final de la matriz se puede ver en la figura 3.49.



a)



b)

Figura 3.48. Planificadora tangencial para rectificado (a) y mecanizado del radio de curvatura (b).



Figura 3.49. Matriz tras acondicionamiento.

El resultado final del radio de curvatura se comprobó mediante una galga de radios, donde se pudo observar a través del proyector de perfiles como no pasaba luz a través del hueco de esta (figura 3.50), por lo que el radio de curvatura de la matriz es el deseado, de 3 mm, salvo en la hendidura aún existente.



Figura 3.50. Comprobación del radio de curvatura con galga a través de proyector de perfiles.

Debido a que para eliminar por completo la hendidura era necesario remover una gran cantidad de material, se decidió fabricar un utillaje a modo de apoyo de la probeta, para que esta durante el doblado solo entrara en contacto con la zona en buen estado de la matriz, ahorrando tiempo y dinero. Para realizar el utillaje, se utilizó una pequeña lámina de metal adherida sobre la matriz, tal y como se puede observar en la figura 3.51.

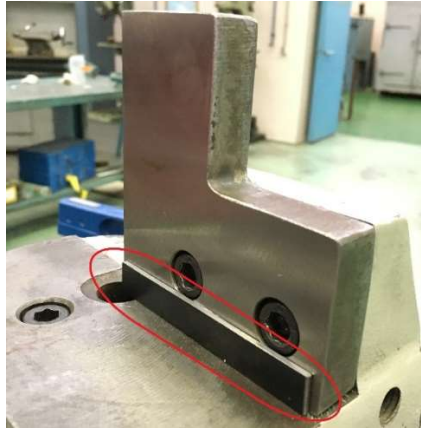
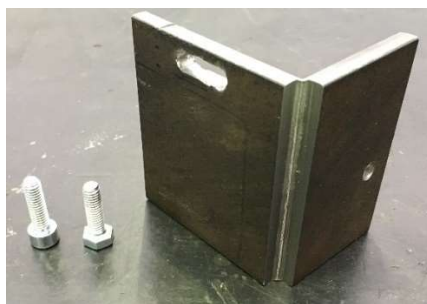


Figura 3.51. Utillaje auxiliar para la matriz.

Por otra parte, debido a que la máquina de doblado DISMA solo permitía plegar con holgura nula entre la matriz y el dado deslizante, era necesario fabricar un utillaje que brindara la posibilidad de hacer plegados con distintas holguras entre 1,7 mm de valor mínimo (H_{\min}) y 6,2 mm de valor máximo (H_{\max}), valores obtenidos a partir de las holguras máximas y mínimas necesarias para realizar los ensayos que posteriormente se describirán. Dicho utillaje se puede apreciar en la figura 3.52.



a)



b)

Figura 3.52. Utillaje regulador de holgura.

Como primera solución, se pensó fabricar un utillaje formado por dos láminas atornilladas sobre el dado deslizante, de tal manera que mediante un calzo del espesor de la holgura deseada se consiguiera el valor buscado mediante su ajuste. Para permitir el ajuste continuo de la holgura, se diseñó una ranura donde se permitiera el deslizamiento del utillaje con las distintas medidas. Esta fue la opción finalmente escogida y llevada a cabo, pudiéndose ver su resultado en la figura 3.52 a).

Para la fabricación del utillaje, se partió de una lámina de metal. En primer lugar, se limó la placa con el objetivo de eliminar imperfecciones, para luego lijar y darle un mejor acabado a la pieza. Como diseño inicial se pensó fabricar el utillaje regula-holgura a partir de dos placas de metal soldadas entre sí, pero finalmente se decidió hacerlo de una sola pieza de metal, doblándola 90° sobre una muela realizada

previamente con la sierra de cinta. Se cortó la lámina de tal manera que esta encajara correctamente sobre el dado deslizante, siendo los parámetros más importantes en este utillaje, la perpendicularidad entre el mismo y la base, y el paralelismo del radio de curvatura de la matriz con el utillaje, de tal manera que no se produzca ningún movimiento del utensilio auxiliar y se garantice que los resultados de los ensayos no se alteren por movimientos indeseados.

Posteriormente se realizaron los taladros de 6 mm, así como el roscado mediante los machos de roscar manuales de la figura 3.53.



Figura 3.53. Herramienta para roscar y machos.

Para fabricar la ranura de la foto 3.52 a, se realizaron varios taladros de 6 mm en una longitud previamente calculada, de tal manera que se pudiera configurar las holguras máximas y mínimas, así como cualquier rango entre ambas. Por último, para dar uniformidad y permitir el deslizamiento del tornillo sobre la ranura, se limó las paredes del hueco.

Finalizada la fabricación del utillaje, se decidió rectificar la cara en contacto con el material plegado de la matriz del dado deslizante, previo limado y lijado, para de esta manera sanearlo y eliminar algunas imperfecciones. A la placa de presión también se optó por realizarle un limado para aplanar irregularidades en su superficie, siendo imposible rectificarla debido a su superficie de apoyo angosta, ya que la rectificadora necesita una superficie de apoyo plana.

3.3 Funcionamiento de la máquina de doblado

En este apartado se van a explicar los pasos necesarios para manejar la máquina de doblado DISMA TRIS con las modificaciones realizadas.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que el material que se vaya a plegar sea lo suficientemente largo para que pueda ser sujetado por la placa de presión, sin que este se desplace (paso 1, figura 3.54). Revisar también que, tanto el material como la sección de la pieza, sean los adecuados según los datos del fabricante. El siguiente paso es la configuración de la máquina. Conocido el ángulo de doblado, se debe posicionar el tope de ángulo de plegado mostrado en la figura 3.41 de manera correcta, midiendo el ángulo entre la matriz de doblado (plano de referencia) y la matriz del dado deslizante con un goniómetro, como el de la figura 3.55. Una vez ajustado el brazo giratorio, se aprieta el tope según muestra el paso 2 de la figura 3.54.



a) Paso 1



b) Paso 2



c) Paso 3

Figura 3.54. Proceso para el doblado de materiales con máquina DISMA TRIS.



Figura 3.55. Goniómetro.

El siguiente parámetro a configurar es la holgura. Para regular este parámetro, se introduce un bloque patrón del espesor de la holgura deseada, como los de la figura 3.56, entre el utillaje y la matriz (paso 3, figura 3.54), y se aprieta tanto el tornillo lateral como el tornillo de la ranura, una vez alcanzada la posición deseada (paso 4, figura 3.57). Ya configurada la holgura, se coloca la probeta encima del utillaje fabricado para evitar la parte dañada de la matriz, con el voladizo deseado, y se asegura esta contra la matriz a través del apriete de la placa de presión, girando el tornillo correspondiente, como muestra el paso 5 de la figura 3.57.



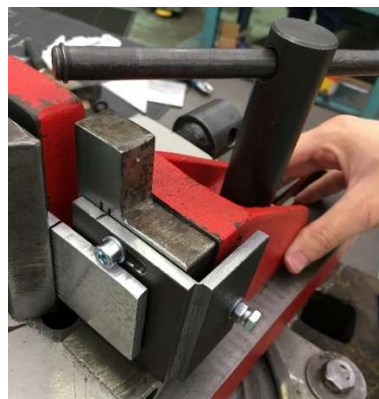
Figura 3.56. Bloques patrón usados para medir holguras.



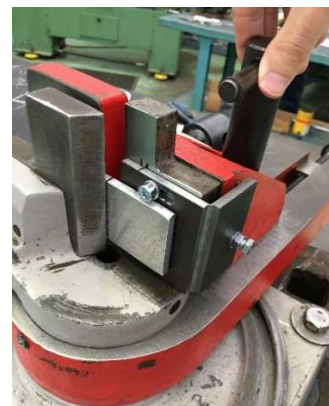
a) Paso 4



b) Paso 5



c) Paso 6



d) Paso 7

Figura 3.57. Proceso para el doblado de materiales con máquina DISMA TRIS.

Para finalizar la configuración de la máquina de doblado, se pega el dado deslizante hacia la probeta, hasta que hagan contacto y se fija su posición con el tornillo (pasos 6 y 7, figura 3.57).

Finalmente, se agarra la herramienta por el mango, y se gira el brazo hasta que el mismo llegue al tope. En el caso de que la pieza fuera difícil de plegar y se necesitara momento extra, se utilizaría la barra auxiliar (paso 8, figura 3.58).



Figura 3.58. Proceso para el doblado de materiales con máquina DISMA TRIS, paso 8.

3.4 Probetas para ensayos

El material proporcionado por el laboratorio de Fabricación constaba de recortes de láminas de aluminio sin caracterizar, y por ende sin conocimiento de sus propiedades, por lo que era necesario realizar el dimensionado y cortado de las probetas, así como un análisis para determinar el tipo de aluminio, de tal manera que se pudiera estudiar el fenómeno de recuperación elástica.

3.4.1 Diseño y fabricación de probetas

Para obtener las probetas con las que se realizarían los ensayos, se eligieron 4 láminas de aluminio de diferentes espesores, procedentes del taller de Fabricación. Estas láminas de aluminio estaban sin clasificar, por lo que se desconocía el tipo de aluminio del que se trataba hasta que se realizara algún tipo de ensayo característico sobre las mismas, como un ensayo de tracción o uno de dureza. La única información que se tenía era relativo a una de las láminas, la cual tenía inscrita la designación “T761”, lo que podría ser el aluminio 7475-T761.

Para realizar la medición de los espesores de las probetas, se utilizó un palpador electrónico de exteriores de la marca MAHR, modelo 838 EA con intervalo de medición de 0-10 mm y división de la escala de 0,005 mm según se muestra en la figura 3.59.



Figura 3.59. Palpador electrónico de exteriores Mahr 838 EA.

La apreciación de esta herramienta de medición llega hasta las 5 milésimas, sin embargo, se van a tomar los espesores redondeado a la décima de milímetro, para así facilitar las operaciones con los mismos. Los valores que se van a utilizar en los cálculos se llamarán de ahora en adelante “espesores efectivos”.

De acuerdo con los espesores de láminas disponibles y las características de la máquina de doblado, se decidió coger un tamaño de probeta como el que aparece en la figura 3.60. Los criterios usados para la elección de dicho tamaño fueron principalmente dos, que fuera un tamaño adecuado para poder ensayarlo en la máquina, de tal manera que la probeta hiciera buen contacto con las matrices, y por otra

parte que hubiera el suficiente número de probetas para realizar los ensayos. De esta manera, de acuerdo con la morfología de las piezas de aluminio en bruto y siguiendo los objetivos anteriores, cada una de las probetas de los distintos materiales se cortó con una dirección de laminado concreta, las probetas del material 1, 2 y 4 se cortaron con las fibras en dirección transversal, mientras que las del material 3 en dirección longitudinal. Esta clasificación de los materiales está realizada teniendo ya en cuenta el valor de dureza, de menor a mayor dureza, siendo el material 1 el que menos tiene. Dicha clasificación se justificará posteriormente.

Se ha comentado anteriormente la importancia de tener en cuenta la dirección de laminado a la hora de realizar el doblado, lo cual puede ser decisivo para la resistencia del material, sin embargo, relativo a la recuperación elástica, la dirección de laminado tiene poca repercusión tal y como demuestran Trzepieckinski y Lemu con ensayos experimentales, a pesar de variar el radio mínimo de doblado [6].

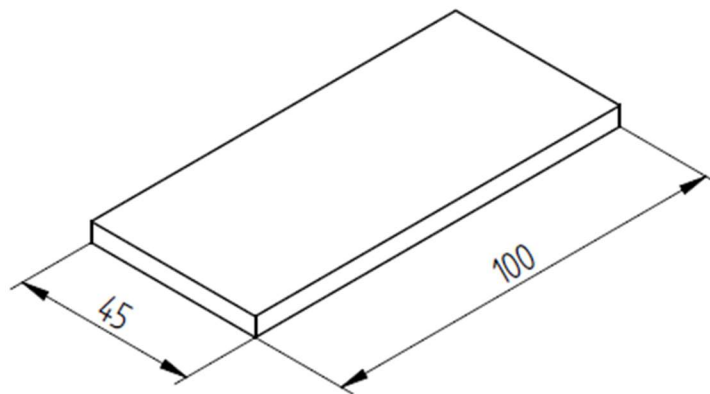


Figura 3.60. Diseño de la probeta escogido. Dimensiones en mm

Con el tamaño de probeta seleccionado, se obtuvo finalmente los números de piezas para cada material, mostrados en la tabla 3.14.

Tabla 3.14. Número y espesor de probetas de los 4 tipos de aluminios disponibles.

Número de probetas disponibles y sus espesores			
Material 1	20 probetas	$T_{\text{real } 1} = 6,200 \text{ mm}$	$T_{\text{efectivo } 1} = 6,2 \text{ mm}$
Material 2	13 probetas	$T_{\text{real } 2} = 4,230 \text{ mm}$	$T_{\text{efectivo } 2} = 4,2 \text{ mm}$
Material 3	7 probetas	$T_{\text{real } 3} = 3,350 \text{ mm}$	$T_{\text{efectivo } 3} = 3,4 \text{ mm}$
Material 4	10 probetas	$T_{\text{real } 4} = 4,950 \text{ mm}$	$T_{\text{efectivo } 4} = 5,0 \text{ mm}$

Para el cortado de las probetas, se limpiaron y se marcaron en el taller las láminas de aluminio en bruto con las medidas descritas anteriormente para cada probeta.

Una vez marcadas y listas las láminas de aluminio, se procedió al corte de estas (figura 3.61). Se usó una tronadora de sierra cinta portátil de la marca BELFLEX modelo BF-120-SCV para los trozos más pequeños y manejables, mientras que, para cortar los trozos más grandes, se utilizó otra sierra fija más grande de la marca FABRIS.



Figura 3.61. Cortado de probetas con sierra de cinta portátil.

Una vez cortadas todas las probetas con las medidas requeridas, se pasó al limado, ya que en algunas había rebabas procedentes del corte, así como ciertas inclusiones que se consideraron necesarias eliminar.

3.4.2 Caracterización del material

Para caracterizar los materiales se llevaron a cabo ensayos de dureza tipo Brinell. Al realizar los ensayos de dureza, se pudo tener una primera aproximación del tipo de material de cada una de las láminas, a partir de los resultados obtenidos mostrados en la tabla 3.15.

Tabla 3.15. Dureza de materiales.

Dureza Brinell probetas	
Material 1	78 HB
Material 2	102 HB
Material 3	128 HB
Material 4	146 HB

El valor de la dureza del material 4, confirmó la sospecha infundada anteriormente, el material 4 corresponde a aluminio 7475-T761 con las propiedades que se muestran en el anexo I.d según la empresa ASM Aerospace Specification Metals Inc [33], debido a que los valores de dureza son bastante parecidos. La letra “T”, indica que a este aluminio se le ha aplicado un tratamiento térmico de endurecimiento estructural.

Para poder clasificar el resto de los aluminios, se ha empleado un buscador de propiedades de materiales [38] el cual ha permitido acotar la búsqueda de posibles candidatos a partir del valor de la dureza. Es necesario enfatizar el hecho de que, solo conociendo el tipo de metal (aluminio) y la dureza Brinell, no es información suficiente para poder caracterizar completamente el material, debido a que pueden existir varios tipos de aluminios con el mismo valor de dureza según los tratamientos térmicos a los que haya sido sometido.

De acuerdo con la información disponible, ha sido posible determinar que, aproximadamente, las denominaciones de los materiales son los de la tabla 3.16. Para el material 1, se ha podido acotar la búsqueda a 4 posibles candidatos, todos ellos de la serie 5000, aluminio 5049 H26, aluminio 5049 H36,

aluminio 5754 H26 y aluminio 5754 H36, todos con dureza Brinell 78 HB, por lo tanto, lo que se conoce con seguridad es que el material 1 pertenece a la serie 5000 de aluminios. Relativo a los materiales 2 y 3, el valor de la dureza y el tipo de material permitió definir un solo tipo de aluminio, 5083 H14 para el material 2 y 2024 T62 para el material 3, aunque en este último caso el valor de dureza que proporciona el buscador oscila entre 128 y 129. En el anexo I se puede encontrar tablas con algunas propiedades de los materiales descritos en la tabla 3.16.

Tabla 3.16. Denominación para cada aluminio.

Serie de aluminio para cada material		
Material 1	AL serie 5000	78 HB
Material 2	AL 5083 H14	102 HB
Material 3	AL 2024 T62	128-129 HB
Material 4	AL 7475 T761	140 HB

3.5 Ensayos

El principal objetivo de este trabajo es obtener resultados experimentales sobre el plegado de probetas de aluminio ante diferentes tipos de parámetros, analizando el comportamiento frente a la recuperación elástica y comparando los resultados con la información proporcionada por diversos autores.

Se van a clasificar los ensayos a realizar según los parámetros que se quieren analizar, distinguiendo 3 tipos para una mejor exposición de estos, aunque a la hora del análisis de resultados se muestren directamente según el parámetro estudiado en vez de por el número de ensayo correspondiente.

3.5.1 Variables experimentales

Se van a tomar medidas de dos parámetros, ángulo y radio de doblado finales. Ambos parámetros han sido seleccionados para su análisis con el objetivo de poder estudiar el fenómeno de recuperación elástica, pudiendo contrastar los resultados experimentales con los teóricos, para lo cual es necesario tener los radios de curvatura de las probetas. Ambas variables van a ser medidas tal y como se describe en la figura 2.23, siendo α y R el ángulo de doblado y el radio de plegado respectivamente.

Para facilitar la toma de datos, se creó la tabla del anexo II.a, aunque los datos de interés se mostrarán posteriormente en tablas.

3.5.2 Ensayo 1

En este ensayo se pretende analizar la influencia del espesor en la recuperación elástica, fenómeno que como se vio anteriormente en el capítulo 2, aumenta a medida que disminuye el espesor del material, si se considera constante el ancho. Se plegarán los diferentes materiales de acuerdo con el proceso mostrado en el capítulo 2, y se medirán sus ángulos de doblado y radios de curvatura después de cierto intervalo de tiempo, midiendo los ángulos mediante el proyector de perfiles. En las probetas, en todos los

ensayos que se realicen, se dejarán 50 mm de voladizo respecto a la matriz, o sea la mitad del largo de las probetas

Se fijarán dos parámetros, ángulo de doblado y holgura de la matriz, realizando los ensayos para los 4 tipos de materiales existentes en este trabajo. La holgura será de 0,5 veces el espesor correspondiente a la lámina y el ángulo de doblado de 90° .

Bajo las condiciones anteriores, se plegará una probeta por material para analizar la recuperación elástica, midiendo el ángulo de doblado después de 24 horas del plegado. A parte de las 4 probetas necesarias para los experimentos anteriormente descritos, se van a ensayar dos probetas más del material de mayor espesor, el material tipo 1, para poder apreciar mediante microscopía óptica la deformación de las fibras. La razón por la que se ha escogido el material 1, es debido a que existe un exceso de probetas de este, y por otra parte es el material más grueso de los 4, por lo que será más fácil la percepción de sus fibras.

La holgura y el ángulo de doblado son los mismos que para el caso anterior. En la figura 3.62 se puede apreciar todas las probetas dobladas para el ensayo 1.

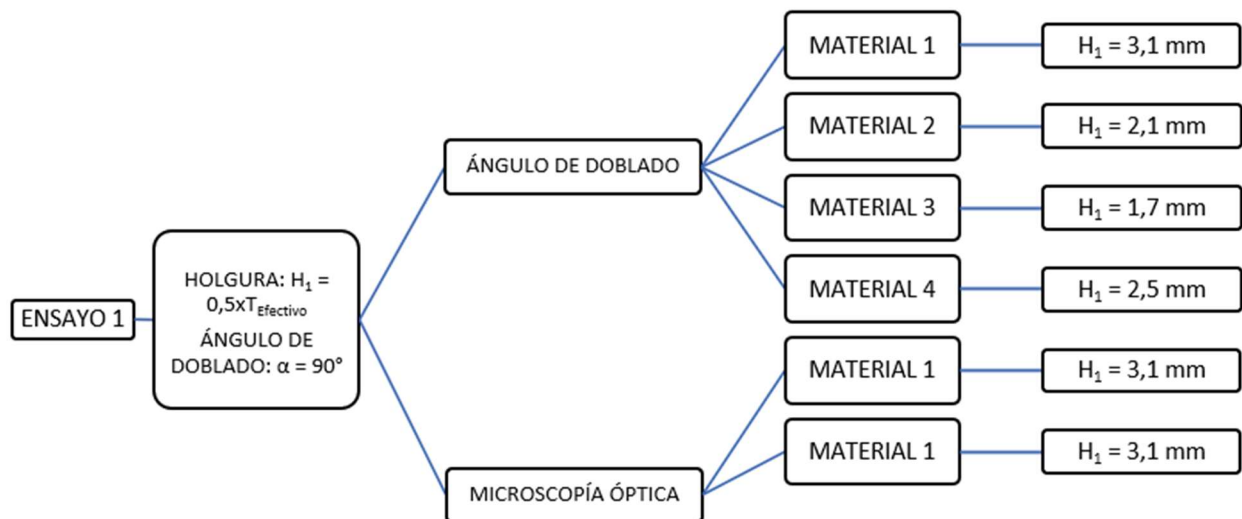


Figura 3.62. Tabla resumen del ensayo 1.

En total para esta prueba serán necesarias:

- Tres probetas del material 1.
- Una probeta del material 2.
- Una probeta del material 3.
- Una probeta del material 4.

3.5.3 Ensayo 2

Para el siguiente ensayo, se va a estudiar la influencia del ángulo de doblado sobre la restitución elástica, fijando la holgura. De acuerdo con Kalpakjian [1], la fórmula que permite calcular el radio de doblado final es la 2.15. Si despejamos de la misma el radio final de doblado R_f (ecuación 3.26), se puede apreciar como a medida que aumenta el radio inicial de doblado R_i , disminuye R_f . Mientras mayor sea el radio de doblado, menor será el ángulo de plegado (ver figura 2.33), por lo que extrapolando de radios a ángulos de doblado se podría llegar a la conclusión de que mientras mayor sea el ángulo inicial de doblado, el ángulo final

disminuirá menos y por ende la recuperación elástica será menor. Este razonamiento coincide con las conclusiones realizadas por Dametew y Gebresenbet [35].

$$R_f = \frac{R_i}{4\left(\frac{R_i Y}{ET}\right)^3 - 3\left(\frac{R_i Y}{ET}\right) + 1} \tag{3.26}$$

Para contrastar los resultados teóricos con la realidad se ha decidido medir la recuperación elástica en los 4 materiales para tres tipos de holguras en función del espesor, H1, H2 y H3 y plegando para 2 ángulos de doblado diferentes, 60° y 120°. Se medirán los ángulos de plegado 24 h después del doblado. La manera de proceder es exactamente igual que en el ensayo anterior, tomando los ángulos y radios de doblado finales, aunque en este caso no se haga uso del microscopio para ver las fibras del material.

En las tablas de las figuras de la 3.63 a la 3.65, se pueden observar los distintos ensayos que se van a realizar, así como el número de probetas necesarias para cada uno de ellos. Para realizar el total de los experimentos del ensayo 2, son necesarias 6 probetas del material 1, 2 y 4, y 3 probetas del material 3.

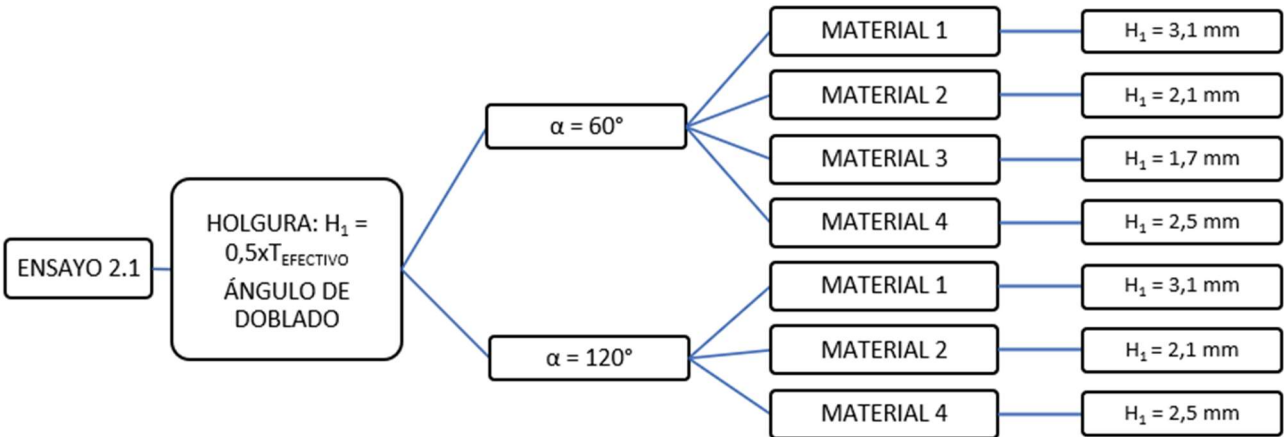


Figura 3.63. Tabla resumen del ensayo 2.1.

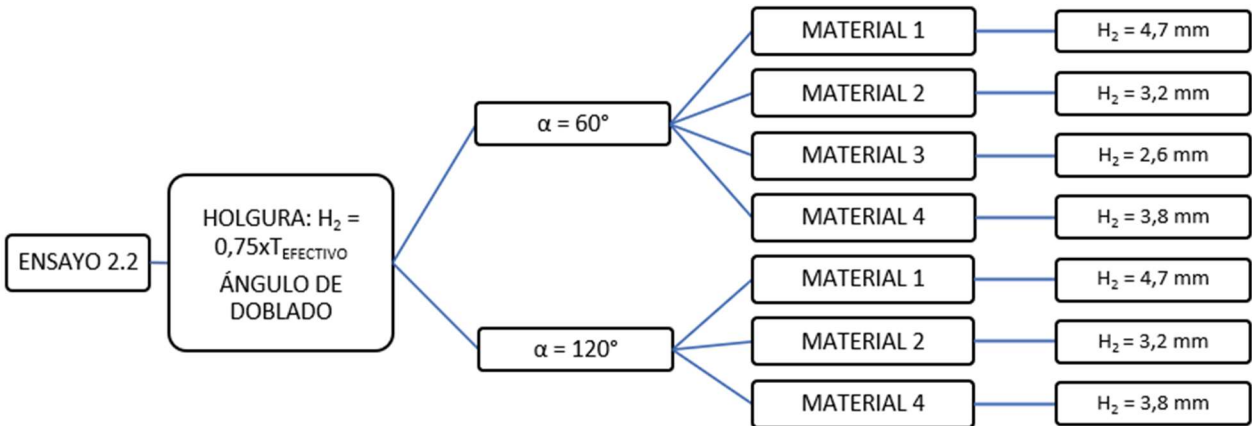


Figura 3.64. Tabla resumen del ensayo 2.2.

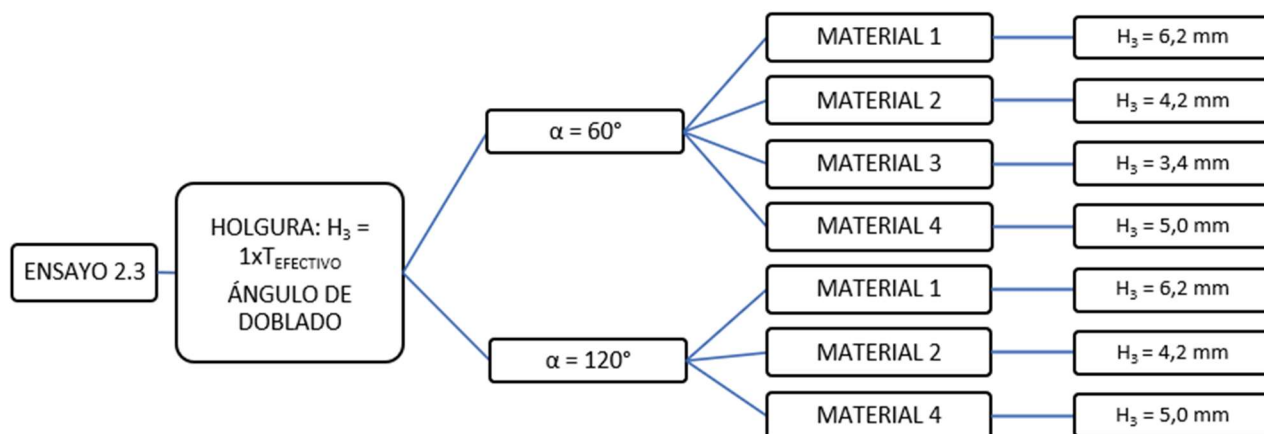


Figura 3.65. Tabla resumen del ensayo 2.3.

3.5.4 Ensayo 3

Este será el último ensayo que se lleve a cabo. Con este ensayo se pretende ver el efecto que tiene la holgura sobre la recuperación elástica. De acuerdo con la información obtenida por Chikalthankar, Belurkar y Nandedkar [36], al disminuir la holgura entre la matriz y el punzón aumenta la recuperación elástica, por lo que se pretende contrastar y verificar dichas conclusiones con la máquina de doblado de dado deslizante disponible.

Este ensayo consistirá en el plegado de probetas de los cuatro tipos de aluminio, para 2 distintos tipos de holguras, todos ellos con un ángulo de doblado α de 90° . Los distintos tipos de holguras son los que se pueden apreciar en la figura 3.66, siendo necesario un total de 2 probetas para cada uno de los materiales.

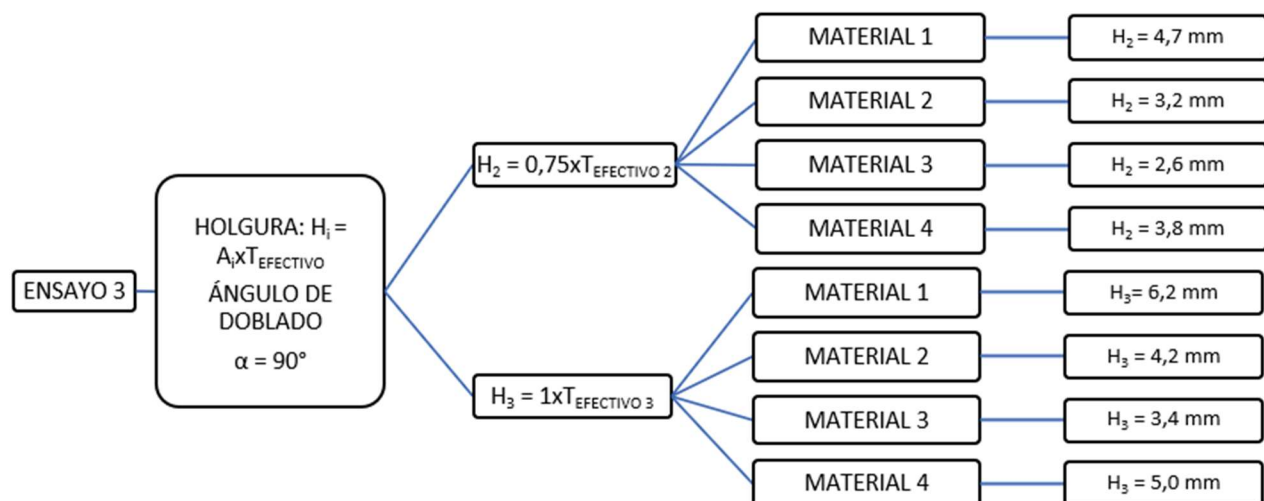


Figura 3.66. Tabla resumen del ensayo 3.

Al igual que en los ensayos anteriores, se medirán los ángulos de doblado, así como los radios de plegado 24 horas después del doblado de las probetas.

Tal y como se comentó anteriormente, para configurar las distintas holguras se van a utilizar bloques patrón, sin embargo, no todas las medidas se encuentran disponibles con un solo bloque, por lo que es necesario combinar hasta dos bloques patrón para poder obtener todas las holguras necesarias. Dichas combinaciones se indican en la tabla 3.17 mostradas en las figuras de la 3.62 a la 3.66.

Tabla 3.17. Combinaciones de bloques patrón usadas.

Bloques patrón					
	H	Bloques		H	Bloques
Material 1	3,1	2+1,1	Material 3	1,7	1,7
	4,7	3+,17		2,6	1+1,6
	6,2	5+1,2		3,4	2+1,4
Material 2	2,1	1+1,1	Material 4	2,5	1+1,5
	3,2	2+1,2		3,8	2+1,8
	4,2	3+1,2		5,0	5

3.6 Toma de datos de resultados experimentales

Una vez realizado el plegado de todas las probetas, se continuó con la medición de las variables experimentales, así como con la realización de la microscopía para la visualización de la fibra neutra. En el anexo II.b se pueden ver fotografías de todas las probetas ensayadas, numeradas de acuerdo con la tabla del anexo II.a.

Para la toma de los radios de curvatura, se han utilizado 3 tipos de galgas (figura 3.67), cada una de las cuales abarca distintos rangos de medidas (radios de 1 mm a 7 mm, de 7,5 mm a 15 mm y de 15,5 mm a 25 mm). Las galgas de radios se basan en el método de la rendija de luz, método por el cual se mide a base de prueba y error distintos radios hasta que se encuentra una la cual impida el paso de la luz entre el radio de curvatura y la galga usada.



Figura 3.67. Galgas de radio.

Para este caso en particular, el uso del método de la rendija de luz es algo complicado, debido a dos imperfecciones, un exceso de material en los laterales del radio de las probetas que se traducen en resaltes que dificultan la medida de este, así como unas marcas sobre las probetas provocadas por la matriz durante el doblado. Los resaltes o pliegues reciben el nombre de *wrinkling*, defecto del material provocado por tensiones de compresión inestables en la zona de plegado (figura 3.68). El *wrinkling* es un

fenómeno indeseado para el correcto ensamblado de los productos, ya que altera la morfología de estos [47] [48]. Por otra parte, las marcas que deja la matriz sobre las probetas son hendiduras que imposibilitan encontrar de manera exacta el ángulo de doblado, ya que, mediante el método de la rendija de luz siempre pasa esta a través de dicha hendidura.

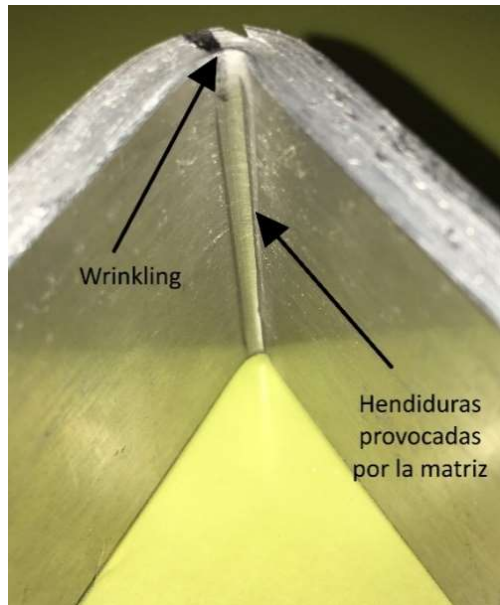


Figura 3.68. Detalle de defectos de doblado, marcas de matriz y wrinkling.

Debido a las deficiencias anteriores, se tomaron de nuevo los radios finales de plegado a partir de microscopía, midiendo los radios de curvatura dibujando círculos a partir de 3 puntos sobre los mismos, tal y como se puede ver en la figura 3.69. Con el microscopio se obtuvieron los radios finales de doblado que se mostrarán posteriormente.

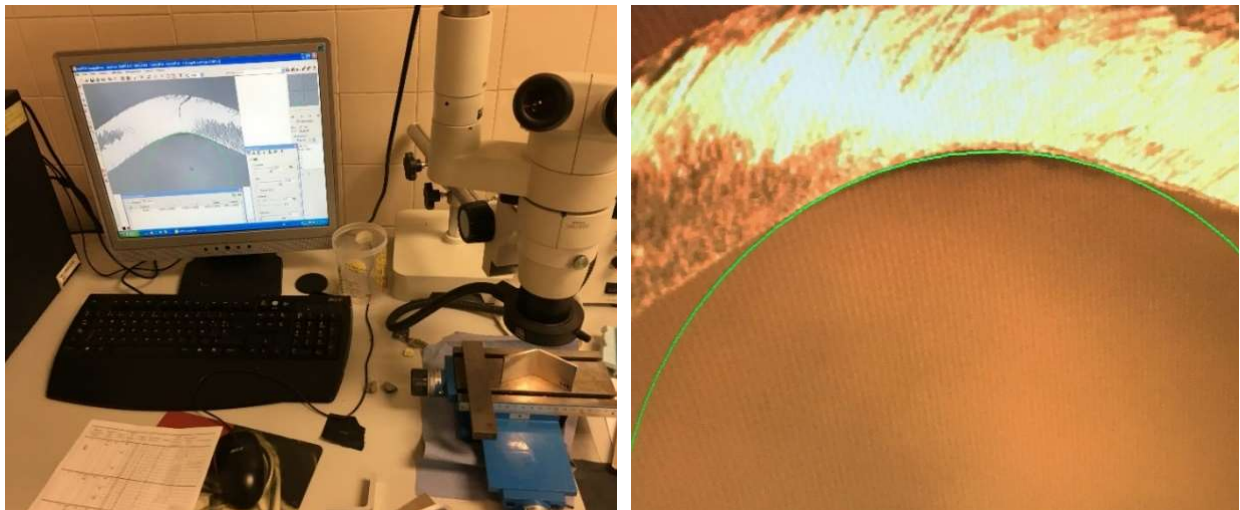


Figura 3.69. Medición de radios de curvatura mediante microscopía.

Tal y como se comentó en el ensayo 1, se plegaron 2 probetas extra del material 1 para cortarlas y apreciar mediante microscopía óptica la deformación de las fibras. Se seccionó una de las probetas por la mitad mediante la sierra de calar portátil, para posteriormente pulir las superficies cortadas con el objetivo de apreciar de manera más fácil las fibras.

Para pulir las probetas se utilizó una máquina pulidora Struers, modelo LoboPol-5 (figura 3.70) usando diferentes tipos de láminas abrasivas circulares de carburo de silicio. Existen distintos tipos de láminas abrasivas según el material y la forma que tengan, sin embargo, uno de los parámetros más importantes es el tamaño de grano de las láminas, clasificándose los distintos tipos mediante un número. Mientras mayor sea el número, más fino será el grano abrasivo [43]. Para pulir la probeta, se usaron láminas abrasivas con tamaño de grano de los números 500, 800, 1200, 2400 y 4000, puliendo la probeta de mayor a menor tamaño de grano hasta conseguir un acabado espejo (figura 3.71).



Figura 3.70. Máquina pulidora Struers LoboPol-5.



a) Antes del pulido



b) Después del pulido

Figura 3.71. Antes y después del pulido de la probeta para análisis de la deformación de las fibras.

Antes de poder apreciar las fibras del material bajo el microscopio, fue necesario atacar la superficie de este con un agente corrosivo llamado *Keller*, formado por cada 100 cm³ de: 2,5 cm³ de ácido fluorhídrico (HF), 1,5 cm³ de ácido clorhídrico (HCl), 2,5 cm³ de ácido nítrico (HNO₃) y 93,5 cm³ de agua. Para realizar el ataque, simplemente se vertió un poco de Keller sobre un recipiente y se frotó la superficie de la probeta hasta que esta quedara blanca (figura 3.72).



Figura 3.72. Ataque de probeta con Keller.

Sin embargo, al colocar la sección de la probeta bajo el microscopio no se pudo apreciar la línea divisoria entre las tracciones y las compresiones, de tal manera que se decidió utilizar otro método para localizar la línea neutra de la probeta. Como alternativa, se tomó la decisión de ensayar otra probeta sobrante del material 1 (probeta número 6) mallándola con un patrón de puntos para que, tras doblarla, se pudiese determinar la localización de la línea neutra.

En primer lugar, se pulió la superficie del lateral de la probeta con la pulidora de la figura 3.70, con un disco abrasivo de tamaño de grano 800. Posteriormente se atacó la superficie con el compuesto Keller y se realizó mediante electrograbado la impresión de un mallado de puntos que serviría para ver los puntos tras el doblado y determinar qué zonas están a tracción y cuales, a compresión, según la morfología de las circunferencias y elipses.

El electrograbado es un proceso por el cual la silueta de un patrón se transfiere al producto a través de una sustancia conductora de la electricidad (electrolito) y la aplicación de electricidad [44]. Como patrón se usó la malla de puntos de la figura 3.73, colocando la probeta, conectada a la fuente de electrograbado de la misma figura, debajo de dicha malla, siendo la probeta el cátodo, para posteriormente pasar el ánodo con el electrolito.



Figura 3.73. Proceso de electrograbado.

Tras grabar la probeta, se procedió a su doblado. Debido a que era la probeta número 6, esta tenía un espesor de 6,2 mm, correspondiéndole según los ensayos un ángulo de doblado de 90° y una holgura de 3,1 mm. El resultado final del plegado se puede apreciar en la figura 3.74.

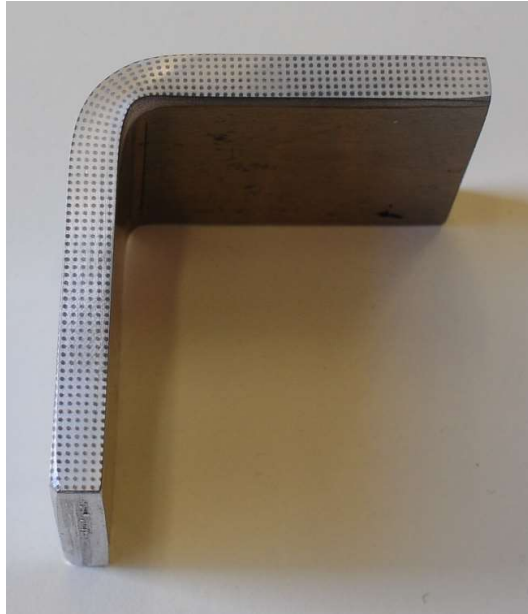


Figura 3.74. Probeta 6 para análisis de la línea neutra.

A simple vista se podía apreciar como las circunferencias exteriores del radio de curvatura estaban expandidas, resultando en elipses, mientras que las circunferencias interiores estaban comprimidas. Estas deformaciones demostraban la existencia de las zonas a tracción y a compresión, sin embargo, para ver con mayor detalle la línea neutra se usó el programa *Argus*. Mediante el programa *Argus*, a través de la toma de varias fotos de la probeta junto a unos patrones (figura 3.75), se consiguió mallar la superficie de la probeta (figura 3.76).



Figura 3.75. Patrones usados para el procesado a partir del programa Argus.

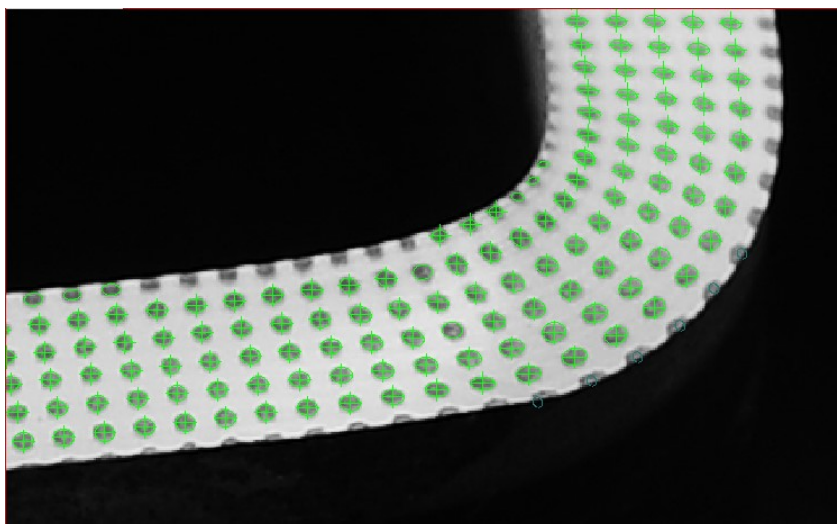


Figura 3.76. Mallado de la probeta con Argus a partir del patrón grabado con electrólisis.

El programa permitía mostrar las máximas y mínimas deformaciones del material, de tal manera que para encontrar la línea neutra solo sería necesario hallar aquellos puntos con deformación cero.

En la figura 3.77 y 3.78, se pueden apreciar las deformaciones máximas y mínimas del material respectivamente en escala logarítmica según un código de colores. La línea neutra se puede ver con mayor detalle en la figura de menores deformaciones. Para determinar la línea neutra, se ha realizado una sección sobre el material y se han graficado las mayores y menores deformaciones para dicha sección (figura 3.80).

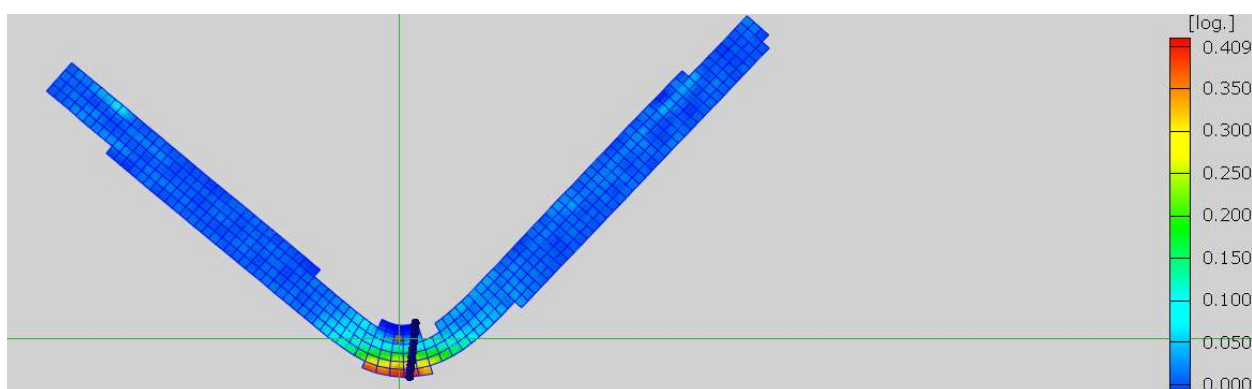


Figura 3.77. Representación de las mayores deformaciones en escala logarítmica con Argus.

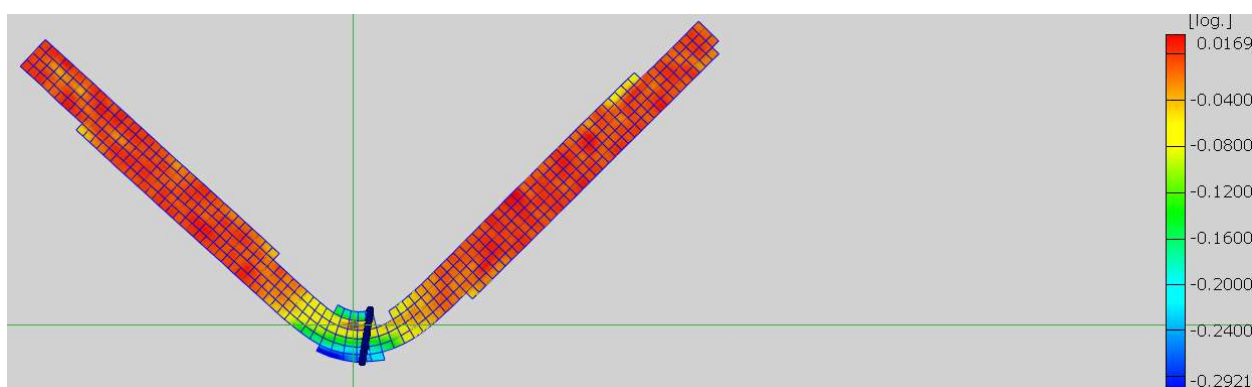


Figura 3.78. Representación de las menores deformaciones en escala logarítmica con Argus.

En la figura 3.79, se puede ver una zona anaranjada señalada por el punto verde, perteneciente a la línea neutra, ya que según la escala de deformaciones es una zona de deformación nula.

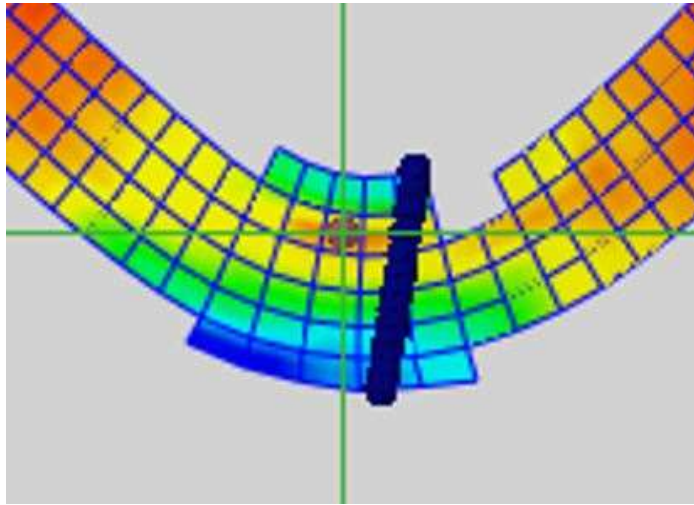


Figura 3.79. Representación de la línea neutra en la probeta 6.

En la figura 3.80, se puede observar la representación de las mayores frente a las menores deformaciones en escala logarítmica para la sección pintada sobre la probeta en la figura 3.79. El punto señalado sobre la gráfica pertenece a la línea neutra ya que las deformaciones máximas y mínimas son cero aproximadamente.

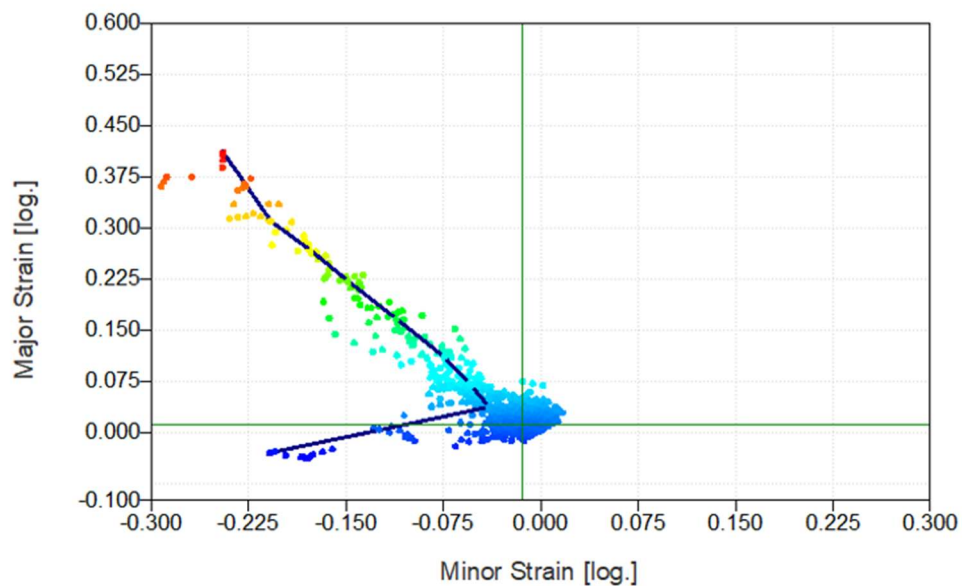


Figura 3.80. Representación de las mayores frente a las menores deformaciones sobre la probeta 6 en la sección representada en azul oscuro de la figura 3.79.

Relativo a los ángulos de doblado, se utilizó el proyector de perfiles para medirlos (figura 3.81), el cual tiene una precisión de 1 minuto.

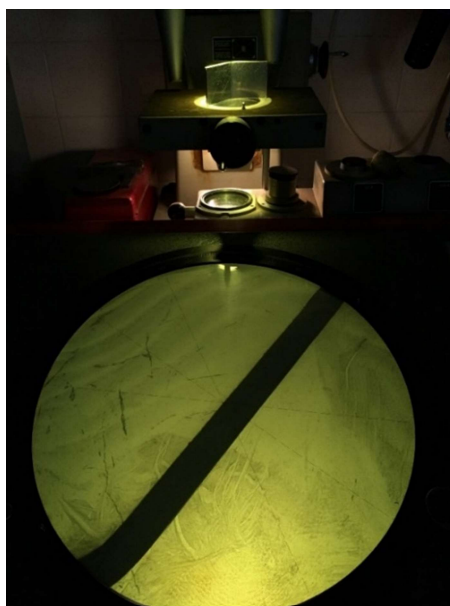


Figura 3.81. Medida del ángulo de doblado de una probeta mediante el proyector de perfiles.

El funcionamiento de esta herramienta es sencillo. En primer lugar, se coloca la probeta en el proyector y se ajustan las manivelas horizontal y vertical hasta alinear la horizontal de la plantilla del proyector con la horizontal de la probeta ensayada. Una vez tomada la referencia, con el dial colocado en cero, se gira el mismo hasta lograr poner paralelo la línea de referencia del proyector de perfiles con la parte doblada de la probeta, y se toma la medida. Existe una primera escala que va indicando de grado en grado con una subdivisión de 20 en 20 minutos, y otra escala que indica de minuto en minuto en caso de no ser exacta la medida.

Por último, para poder llevar un seguimiento temporal de la evolución del ángulo de doblado de las probetas, se diseñó una plantilla sobre la cual se dibujaría las siluetas de las probetas para su posterior contraste.

3.7 Resultados de los ensayos

Para facilitar la toma de datos y la identificación de las probetas, se marcaron todas con un número de identificación, correspondiéndole un determinado ángulo de doblado y holgura para los ensayos según este número.

En la tabla creada para la toma de datos, adjunta en el anexo II.a, se puede apreciar la nomenclatura elegida para la identificación de las probetas. En este apartado se introduce las tablas de 3.18 a 3.21, donde se presentan todos los resultados experimentales medidos, donde L es indicativo de que la dirección de laminado de la probeta es en dirección longitudinal mientras que T indica que esta es transversal a la mayor dimensión de la probeta.

Además, se adjunta una foto que recoge todas y cada una de las probetas ensayadas a lo largo de los experimentos (figura 3.82), sin embargo, en el anexo se han introducido fotos detalladas de las probetas por si es necesaria su visualización. La figura a) de la imagen 3.82, representa al material 1, la b) al material 2, c) al material 3 y d) al material 4, representando cada columna un ángulo de doblado (de izquierda a

derecha de menor a mayor ángulo) y cada fila una holgura diferente, salvo para el material 1 doblado a 90° donde hay probetas extra plegadas.

Tabla 3.18. Resultados de los ensayos del material 1.

Material 1 (dureza Brinell 78 HB, espesor $T_{\text{efectivo } 1} = 6,2 \text{ mm}$)					
N.º probeta	Laminado	H [mm]	α_i [°]	α_f [°]	R_f [mm]
1	T	3,1	60	55,35	16,45
2	T	4,7		58,67	7,27
3	T	6,2		58,70	5,25
4	T	3,1	90	88,30	3,43
5	T	3,1		-	-
6	T	3,1		88,85	3,15
7	T	4,7		90,50	2,90
8	T	6,2		88,33	2,66
9	T	3,1	120	119,05	1,80
10	T	4,7		118,15	2,09
11	T	6,2		119,45	1,58

Tabla 3.19. Resultados de los ensayos del material 2.

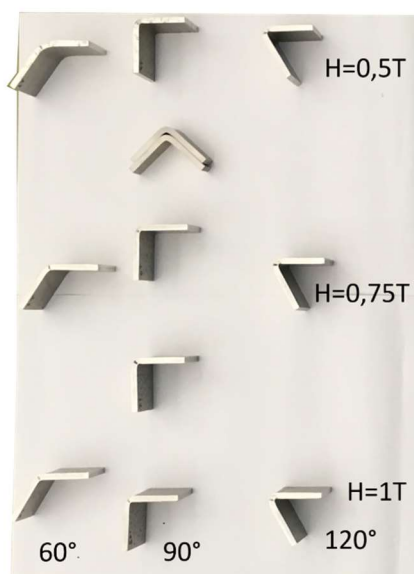
Material 2 (dureza Brinell 102 HB, espesor $T_{\text{efectivo } 2} = 4,2 \text{ mm}$)					
N.º probeta	Laminado	H [mm]	α_i [°]	α_f [°]	R_f [mm]
12	T	2,1	60	52,70	6,40
13	T	3,2		54,55	3,55
14	T	4,2		57,45	2,19
15	T	2,1	90	92,87	1,79
16	T	3,2		97,47	1,39
17	T	4,2		FRACTURA	FRACTURA
18	T	2,1	120	FRACTURA	FRACTURA
19	T	3,2		FRACTURA	FRACTURA
20	T	4,2		FRACTURA	FRACTURA

Tabla 3.20. Resultados de los ensayos del material 3.

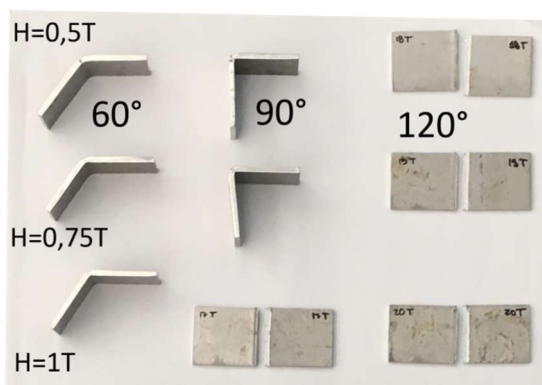
Material 3 (dureza Brinell 128 HB, espesor $T_{\text{efectivo } 3} = 3,4 \text{ mm}$)					
N.º probeta	Laminado	H [mm]	α_i [°]	α_f [°]	R_f [mm]
21	L	1,7	60	52,30	7,02
22	L	2,6		51,40	6,71
23	L	3,4		56,28	5,82
24	L	1,7	90	FRACTURA	FRACTURA
25	L	2,6		FRACTURA	FRACTURA
26	L	3,4		FRACTURA	FRACTURA

Tabla 3.21. Resultados de los ensayos del material 4.

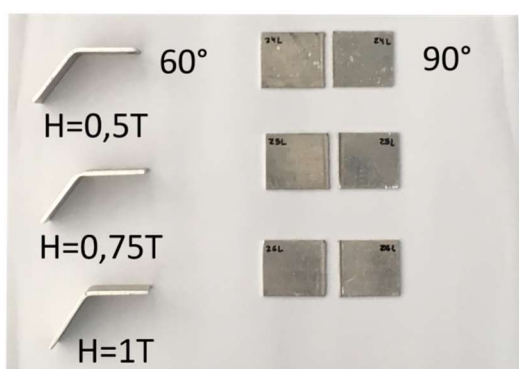
Material 4 (dureza Brinell 146 HB, espesor $T_{\text{efectivo } 4} = 5,0 \text{ mm}$)					
N.º probeta	Laminado	H [mm]	α_i [°]	α_f [°]	R_f [mm]
27	T	2,5	60	58,15	6,04
28	T	3,8		52,00	5,70
29	T	5,0		57,43	4,80
30	T	2,5	90	FRACTURA	FRACTURA
31	T	3,8		FRACTURA	FRACTURA
32	T	5,0		FRACTURA	FRACTURA
33	T	2,5	120	FRACTURA	FRACTURA
34	T	3,8		FRACTURA	FRACTURA
35	T	5,0		FRACTURA	FRACTURA



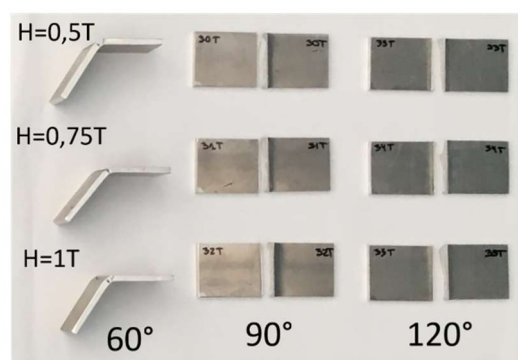
a) Material 1



b) Material 2



c) Material 3



d) Material 4

Figura 3.82. Resultados de la realización de los ensayos.

En este capítulo se presentan las variables calculadas con ecuaciones teóricas para su contraste con la experimentación, se analiza la evolución de estas con diversos parámetros hablando sobre las posibles causas, y se introducen gráficas de los casos estudiados para una mejor comprensión.

4.1 Resultados teóricos sobre recuperación elástica

Se han seleccionado 3 expresiones analíticas diferentes, descritas en el capítulo 2, las cuales se han nombrado con los siguientes subíndices según la expresión utilizada: 1 para la expresión 2.18 ($\Delta\alpha_1$), 2 para la ecuación 2.15 ($\Delta\alpha_2$) y 3 para la ecuación 2.20 ($\Delta\alpha_3$).

Para realizar los cálculos, han sido necesarias las siguientes propiedades de los materiales: módulo de Young, coeficiente de Poisson, coeficiente de Hollomon, exponente de endurecimiento por deformación, radio de plegado inicial, espesor del material y límite elástico. Algunas de las propiedades anteriores se conocen de caracterizar los materiales en el capítulo 3 (tablas de propiedades en anexo I), sin embargo, otras se han tenido que aproximar.

En la tabla 4.22, se muestran los valores numéricos usados para las propiedades necesarias según las fórmulas 2.15, 2.18 y 2.20, mostrándose en rojo los valores aproximados.

Tabla 4.22. Valores numéricos de propiedades para el cálculo de recuperaciones elásticas.

Propiedades usadas para el cálculo de recuperaciones elásticas				
	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
E [GPa]	68-69	68	72,4	70,3
ν	0,33	0,33	0,33	0,33
K [MPa]	240	240	690	400
n	0,15	0,15	0,16	0,17
R_i [mm]	3	3	3	3
T [mm]	6,2	4,2	3,4	5,0
Y [MPa]	220	290	340	448

Los valores de K y n no suelen estar disponibles para cualquier material, ya que estos dependen de factores como el tipo de metal y aleación, así como del tratamiento térmico aplicado, por lo que se suelen utilizar valores aproximados.

Para los materiales 1 y 2, se ha supuesto K y n según la aproximación para aleaciones de aluminio recocido, de acuerdo con los valores proporcionados por Shehata, de la universidad de Zagazig [52]. Relativo a los materiales 3 y 4 y, los valores de K y n se han obtenido a partir de aluminios de la misma serie, pero con algunas diferencias. Para el material 3 (aluminio 2024 T62), se han utilizado los valores del aluminio 2024-

T4 [3], siendo ambos el mismo material, pero con diferentes tratamientos. Por otra parte, para el material 4, la referencia más cercana que se ha encontrado es para un aluminio de la misma serie, el 7075, el cual posee el mismo elemento principal de aleación (Zinc) [53].

Para el cálculo de las restituciones elásticas según la ecuación 2.20, son necesarias las tensiones de fluencia de los materiales, valores que se van a aproximar a partir del límite elástico, ya que son parecidos, pero corrigiéndolos debido a la deformación plana o sea $S = \frac{2}{\sqrt{3}} Y$. Para esta misma ecuación también son necesarios los valores de los radios de curvatura de las líneas neutras, presentándose estos en la tabla 4.23. Es requerido, para que se mantengan las hipótesis realizadas en la ecuación 2.20, que el valor de λ para el cálculo de ρ sea igual a 0,5, ya que se supuso que la línea neutra coincidía con la línea media del material ensayado.

Tabla 4.23. Valores del radio de curvatura de la línea neutra.

Valores de ρ para los distintos materiales [mm]						
	R_i [mm]	T [mm]	$\frac{R_i}{T}$	λ	ρ ($\lambda = 0,42$)	ρ ($\lambda = 0,50$)
Material 1	3	6,2	0,48	0,42	5,604	6,100
Material 2		4,2	0,71	0,42	4,764	5,100
Material 3		3,4	0,88	0,42	4,428	4,700
Material 4		5,0	0,60	0,42	5,100	5,500

Tal y como se explicó en el capítulo 3, el material 1 no se pudo especificar de manera concreta debido a que solo con el valor de dureza se encontraban varios materiales candidatos. Sin embargo, la única propiedad que varía entre las diversas opciones es el módulo de elasticidad, encontrándose entre 68 y 69 GPa, por lo que calculando para esos dos valores la recuperación elástica se puede concluir que la diferencia es despreciable.

Finalmente, los valores teóricos y experimentales se muestran en las tablas de la 4.24 a la 4.27, donde “F” indica fractura de la probeta.

Tabla 4.24. Recuperación elástica experimental y teórica para material 1.

Recuperación elástica experimental y teórica para material 1								
Material 1	Probeta	$\Delta\alpha_{exp}$ [°]	$\Delta\alpha_1$ [°]	$\Delta\alpha_2$ [°]	$\Delta\alpha_3$ [°]	$\frac{\Delta\alpha_{exp}}{\alpha_i}$	$\frac{\rho}{T}$	R_f [mm]
	1	4,65	0,30	0,28	0,59	0,0775	0,984	16,45
	2	1,33	0,30	0,28	0,59	0,0222		7,27
	3	1,30	0,30	0,28	0,59	0,0217		5,25
	4	1,70	0,45	0,42	0,88	0,0189		3,43
	5	-	-	-	-	-		-
	6	1,15	0,45	0,42	0,88	0,0128		3,15
	7	-0,50	0,45	0,42	0,88	0,0056		2,90
	8	1,67	0,45	0,42	0,88	0,0186		2,66
	9	0,95	0,60	0,56	1,18	0,0079		1,80
	10	1,85	0,60	0,56	1,18	0,0154		2,09
	11	0,55	0,60	0,56	1,18	0,0046		1,58

Tabla 4.25. Recuperación elástica experimental y teórica para material 2.

Recuperación elástica experimental y teórica para material 2								
Material 2	Probeta	$\Delta\alpha_{exp}$ [°]	$\Delta\alpha_1$ [°]	$\Delta\alpha_2$ [°]	$\Delta\alpha_3$ [°]	$\frac{\Delta\alpha_{exp}}{\alpha_i}$	$\frac{\rho}{T}$	R_f [mm]
	12	7,30	0,42	0,55	0,96	0,1217	1,214	6,40
	13	5,45	0,42	0,55	0,96	0,0908		3,55
	14	2,55	0,42	0,55	0,96	0,0425		2,19
	15	-2,87	0,63	0,82	1,44	-0,032		1,79
	16	-7,47	0,63	0,82	1,44	-0,083		1,39
	17	F	0,63	0,82	1,44	F		F
	18	F	0,84	1,10	1,92	F		F
	19	F	0,84	1,10	1,92	F		F
	20	F	0,84	1,10	1,92	F		F

Tabla 4.26. Recuperación elástica experimental y teórica para material 3.

Recuperación elástica experimental y teórica para material 3								
Material 3	Probeta	$\Delta\alpha_{exp}$ [°]	$\Delta\alpha_1$ [°]	$\Delta\alpha_2$ [°]	$\Delta\alpha_3$ [°]	$\frac{\Delta\alpha_{exp}}{\alpha_i}$	$\frac{\rho}{T}$	R_f [mm]
	21	7,70	1,35	0,75	1,20	0,1283	1,382	7,02
	22	8,60	1,35	0,75	1,20	0,1433		6,71
	23	3,72	1,35	0,75	1,20	0,062		5,82
	24	F	2,02	1,12	1,80	F		F
	25	F	2,02	1,12	1,80	F		F
	26	F	2,02	1,12	1,80	F		F

Tabla 4.27. Recuperación elástica experimental y teórica para material 4.

Recuperación elástica experimental y teórica para material 4								
Material 4	Probeta	$\Delta\alpha_{exp}$ [°]	$\Delta\alpha_1$ [°]	$\Delta\alpha_2$ [°]	$\Delta\alpha_3$ [°]	$\frac{\Delta\alpha_{exp}}{\alpha_i}$	$\frac{\rho}{T}$	R_f [mm]
	27	1,85	0,58	0,69	1,30	0,0308	1,10	6,04
	28	8,00	0,58	0,69	1,30	0,1333		5,70
	29	2,57	0,58	0,69	1,30	0,0428		4,80
	30	F	0,87	1,03	1,95	F		F
	31	F	0,87	1,03	1,95	F		F
	32	F	0,87	1,03	1,95	F		F
	33	F	1,16	1,38	2,60	F		F
	34	F	1,16	1,38	2,60	F		F
	35	F	1,16	1,38	2,60	F		F

4.2 Cálculo de posición de la línea neutra

En el capítulo 2, se presentaron varias maneras de calcular la posición de la línea neutra para láminas de acero plegadas a 90°. La probeta que se ensayó para su análisis en microscopía se plegó a 90°, pero es de diferente material, aluminio. Pese a lo anterior, se va a calcular teóricamente la posición de su línea neutra, para posteriormente contrastar dicho resultado con el valor experimental, el cual se obtuvo mediante el programa *Argus* arrojando un valor de 1,7 mm del radio interior de doblado.

Se recuerda que la probeta usada para el cálculo experimental de la línea neutra era del material 1, con $T=6,2$ mm, y radio de doblado $R_i = 3$ mm

4.2.1 Cálculo de XL_N mediante coeficiente ψ

Calculando el ratio R_i/T , cuyo resultado es 0,484, que aproximándolo a 0,5 y entrando en la tabla 2.6, proporciona un valor de ψ igual a 0,387, se obtiene un valor de $XL_N = 0,387 \times 6,2$ mm = 2,4 mm

4.2.2 Cálculo de XL_N de forma aproximada

Introduciendo el espesor T y $R = R_i$ en la fórmula 2.5, se obtiene un valor de XL_N igual a 1,72 mm

El resto de las aproximaciones para el cálculo de XL_N mostradas en el capítulo 2 no se utilizan, bien debido a que el espesor es demasiado alto y no se tiene información sobre los coeficientes para el espesor de interés, o bien debido a que no tienen en cuenta el espesor del material. En la tabla 4.28 se puede apreciar un resumen de los valores de XL_N para los 3 métodos usados.

Tabla 4.28. Valores de XL_N para la probeta 6.

Valores de XL_N para probeta 6 ($T = 6,2$ mm)	
Experimental (<i>Argus</i>)	$X = 1,7$ mm
Con coeficiente ψ	$X = 2,4$ mm
De forma aproximada	$X = 1,72$ mm

4.3 Comparación entre resultados teóricos y experimentales

Contrastando los resultados experimentales de recuperación elástica con los teóricos de las tablas 4.29 a 4.32, se puede apreciar que estos distan mucho unos de otros de manera general para todas las expresiones analíticas usadas. Salvo para el material 3, donde la ecuación que más se ajusta a la realidad es la 2.18, para el resto la expresión con valores más cercanos a los experimentales son los de la ecuación 2.20.

Tabla 4.29. Comparativa entre recuperación elástica experimental y teórica para material 1.

Comparativa entre recuperación elástica para material 1				
Material 1	Probeta	$\Delta\alpha_{exp} - \Delta\alpha_1 [^\circ]$	$\Delta\alpha_{exp} - \Delta\alpha_2 [^\circ]$	$\Delta\alpha_{exp} - \Delta\alpha_3 [^\circ]$
	1	4,35	4,37	4,06
	2	1,03	1,05	0,74
	3	1,00	1,02	0,71
	4	1,26	1,28	0,82
	5	-	-	-
	6	0,70	0,73	0,27

Material 1	Probeta	$\Delta\alpha_{\text{exp}} - \Delta\alpha_1 [^\circ]$	$\Delta\alpha_{\text{exp}} - \Delta\alpha_2 [^\circ]$	$\Delta\alpha_{\text{exp}} - \Delta\alpha_3 [^\circ]$
	7	-0,95	-0,92	-1,38
	8	1,22	1,25	0,79
	9	0,35	0,39	-0,23
	10	1,25	1,29	0,67
	11	-0,05	-0,01	-0,63

Tabla 4.30. Comparativa entre recuperación elástica experimental y teórica para material 2.

Comparativa entre recuperación elástica para material 2				
Material 2	Probeta	$\Delta\alpha_{\text{exp}} - \Delta\alpha_1 [^\circ]$	$\Delta\alpha_{\text{exp}} - \Delta\alpha_2 [^\circ]$	$\Delta\alpha_{\text{exp}} - \Delta\alpha_3 [^\circ]$
	12	6,88	6,75	6,34
	13	5,03	4,90	4,49
	14	2,13	2,00	1,59
	15	-3,50	-3,69	-4,31
	16	-8,10	-8,29	-8,91
	17	F	F	F
	18	F	F	F
	19	F	F	F
	20	F	F	F

Tabla 4.31. Comparativa entre recuperación elástica experimental y teórica para material 3.

Comparativa entre recuperación elástica para material 3				
Material 3	Probeta	$\Delta\alpha_{\text{exp}} - \Delta\alpha_1 [^\circ]$	$\Delta\alpha_{\text{exp}} - \Delta\alpha_2 [^\circ]$	$\Delta\alpha_{\text{exp}} - \Delta\alpha_3 [^\circ]$
	21	6,35	6,95	6,50
	22	7,25	7,85	7,40
	23	2,37	2,97	2,52
	24	F	F	F
	25	F	F	F
	26	F	F	F

Tabla 4.32. Comparativa entre recuperación elástica experimental y teórica para material 4.

Comparativa entre recuperación elástica para material 4				
Material 4	Probeta	$\Delta\alpha_{\text{exp}} - \Delta\alpha_1 [^\circ]$	$\Delta\alpha_{\text{exp}} - \Delta\alpha_2 [^\circ]$	$\Delta\alpha_{\text{exp}} - \Delta\alpha_3 [^\circ]$
	27	1,27	1,16	0,55
	28	7,42	7,31	6,70
	29	1,99	1,88	1,27
	30	F	F	F
	31	F	F	F
	32	F	F	F
	33	F	F	F
	34	F	F	F
	35	F	F	F

Pueden existir varias causas por las que no se ajusten estos resultados teóricos a los experimentales. En primer lugar, está el desarrollo de estas, ya que ninguna tiene en cuenta el efecto de la holgura. Por otra parte, estas ecuaciones probablemente se hayan contrastado con determinados materiales y ángulos de 90° , ya que es el ángulo más extendido, por lo que se ajustarían mejor a esas condiciones. Hay indicios de que los valores teóricos se ajustan mejor para 90° , debido a que para dicho ángulo la disparidad de resultados es menor con respecto a los otros. Para el material 1, la diferencia máxima entre los resultados teóricos y experimentales es de $1,28^\circ$, mientras que la mínima es de $0,27^\circ$ para $\alpha_i = 90^\circ$. Sin embargo, esta afirmación no se puede contrastar debido a que no se tienen las suficientes probetas sin fracturar para todos los materiales.

Relativo a las hipótesis realizadas, hay algunas que son discutibles. Se ha supuesto en la ecuación 2.18 que el grosor del material es muy pequeño con respecto a las otras dos dimensiones, sin embargo, esta suposición no es del todo acertada debido a que los grosores de las probetas son bastantes grandes, lo que puede alterar las hipótesis y por lo tanto los resultados que pueda arrojar esta expresión.

Para la fórmula 2.20, se introdujo la hipótesis de que la línea neutra coincidía con la línea media, por lo tanto, $\lambda = 0,5$, sin embargo, se ha demostrado tanto experimentalmente como analíticamente con el cálculo de λ , que esta hipótesis no es cierta. En la figura 3.79, se puede observar como la línea neutra está desplazada hacia el interior del radio de curvatura del material, mientras que en la tabla 4.23 se pueden apreciar los valores de λ calculados según la tabla 2.10 del capítulo 2, valores que difieren del ideal (o sea $\lambda = 0,5$).

Existe otra posible fuente de error, las propiedades mecánicas usadas. Al haber aproximado los materiales mediante valores de dureza, puede que las propiedades mecánicas difieran en la realidad, y por ende los valores de recuperación elástica teóricas.

A pesar de todo lo anterior, las 3 expresiones concuerdan con la teoría y ratifican el hecho de que, mientras mayor sea el ángulo de doblado, mayor será la recuperación elástica para un mismo material.

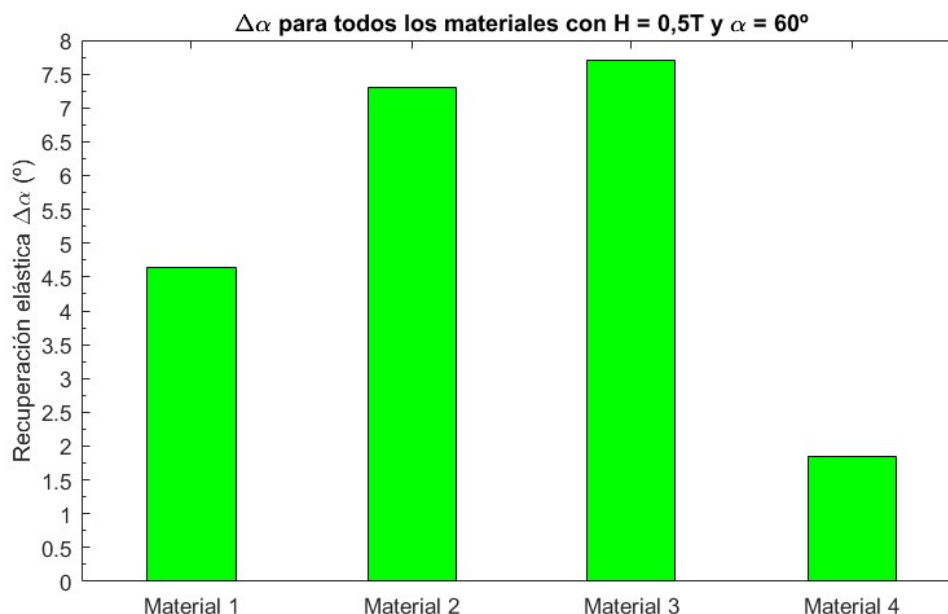
En algunos casos se han dado valores de restitución elástica negativos, no siendo este fenómeno coherente con lo esperado. Sin embargo, teniendo en cuenta que los materiales donde se han obtenido dichos resultados presentaban una fractura en su radio de curvatura (probetas 7, 15 y 16), se podría pensar que, como consecuencia de esta condición, el material en dicha zona deje de estar traccionado y por lo tanto prevalezca la zona a compresión frente a la de tracción, influyendo en el valor final de doblado. Pese a lo anterior, existen probetas con recuperación elástica positiva que presentan una fractura en su radio de curvatura. Otra posible causa de las recuperaciones elásticas negativas podría ser la existencia de tensiones residuales en las probetas, de tal manera que, si se quisiera analizar todas las probetas en igualdad de condiciones, habría que realizarles a todas un tratamiento de alivio de tensiones. A pesar de ello, lo anterior no ha sido posible corroborarlo por lo que solo es una hipótesis.

Por otra parte, durante los ensayos se observó que, transcurridas 24 horas del plegado, la recuperación elástica apenas variaba, por lo que se podría suponer que en ese intervalo de tiempo se daba la restitución elástica al completo. Para comprobar la conclusión anterior se utilizaron unas plantillas y se dibujaron las siluetas de las probetas 24 y 48 horas después sobre estas platillas.

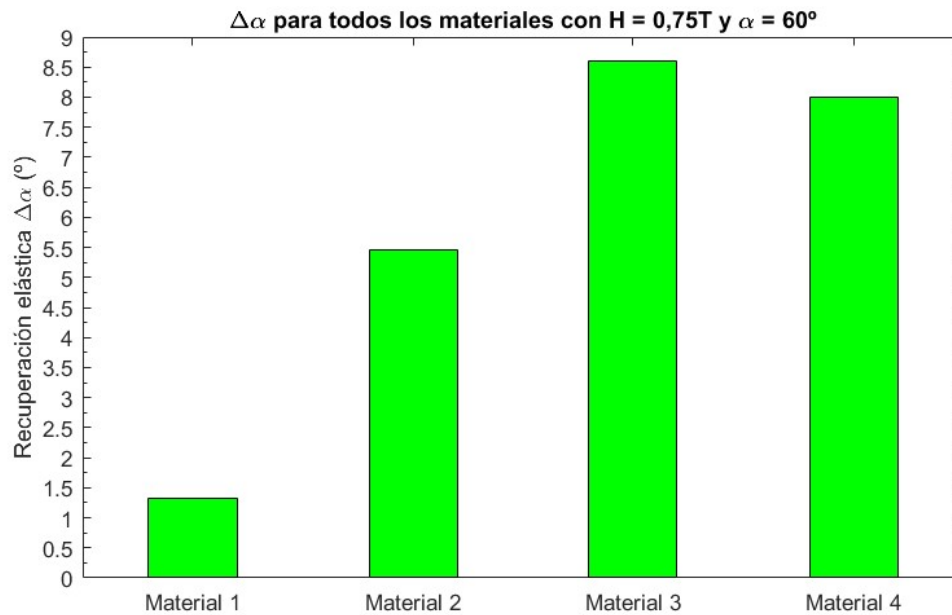
4.3.1 Influencia del material sobre la recuperación elástica

Según la literatura, el incremento de ángulo de doblado aumenta, y por ende la recuperación elástica, mientras menor sea el módulo de Young y el espesor del material doblado.

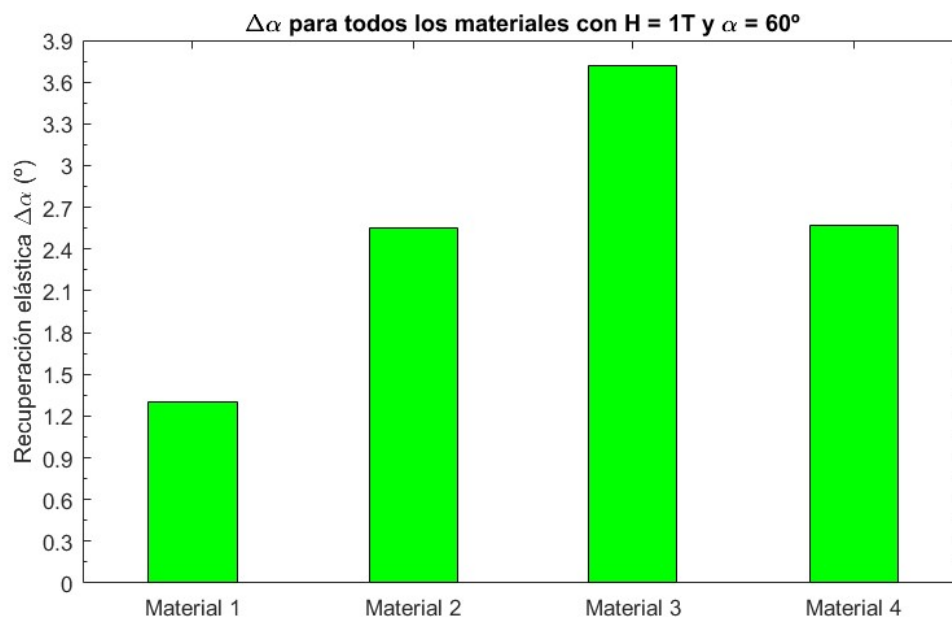
Si se analizan las recuperaciones elásticas de todos los materiales para una misma holgura y ángulo de doblado, (siendo el único caso disponible para todos los materiales el de $\alpha_i = 60^\circ$) se puede observar en las gráficas de 4.1 a 4.3 como aumenta la recuperación elástica del material 1 al 3, para luego bajar con el material 4. La única diferencia en los casos anteriores es la magnitud de disminución del ángulo de doblado para el material 4.



Gráfica 4.1. Recuperación elástica para todos los materiales con $H=0,5T$ y $\alpha_i=60^\circ$.



Gráfica 4.2. Recuperación elástica para todos los materiales con $H=0,75T$ y $\alpha_i=60^\circ$.



Gráfica 4.3. Recuperación elástica para todos los materiales con $H=1T$ y $\alpha_i=60^\circ$.

De acuerdo con la caracterización de los materiales, los módulos de Young ordenados de mayor a menor quedarían de la siguiente manera (correspondiendo el subíndice al tipo de material de acuerdo con la clasificación realizada): $E_3 > E_4 > E_1 > E_2$, mientras que para los espesores: $T_1 > T_4 > T_2 > T_3$. Tal y como se puede ver en las gráficas 4.1 a 4.3, manteniendo constante la holgura y el ángulo de doblado, las mayores recuperaciones elásticas relativas se dan para el material 3, lo cual concuerda con el espesor de este, ya que es el menor de los 4 materiales. Sin embargo, su módulo de Young es el mayor de todos, por lo que entraría en discordia con lo visto en la teoría.

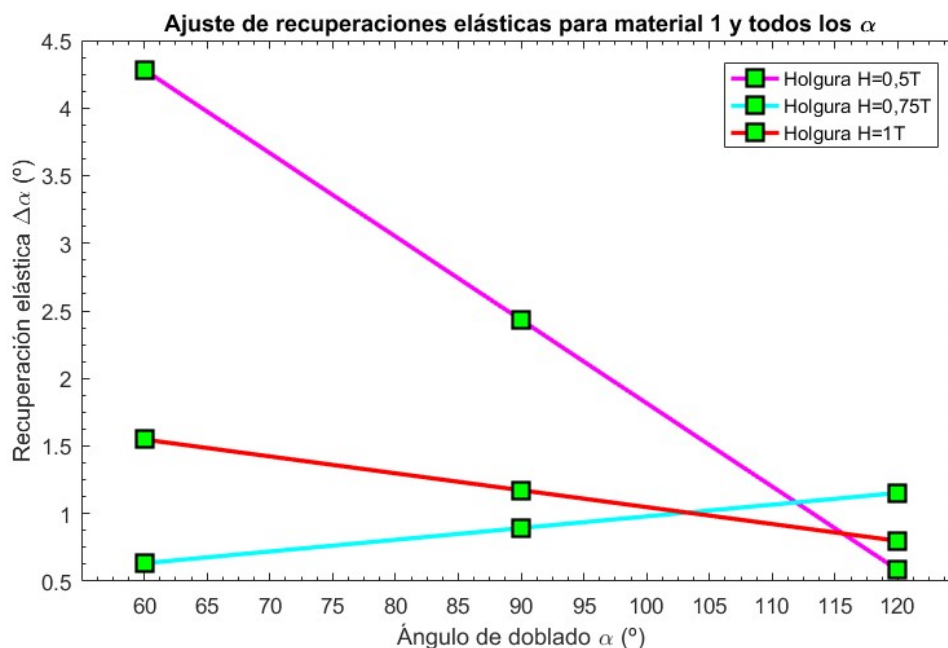
Dado estos resultados podría ser la influencia del espesor dominante frente a la influencia del módulo de Young para la recuperación elástica. Sin embargo, habría que tener en cuenta que la caracterización del

material se ha hecho de manera aproximada mediante los valores de las durezas Brinell, por lo que los valores de las propiedades mecánicas podrían cambiar.

4.3.2 Influencia del ángulo de doblado sobre la recuperación elástica

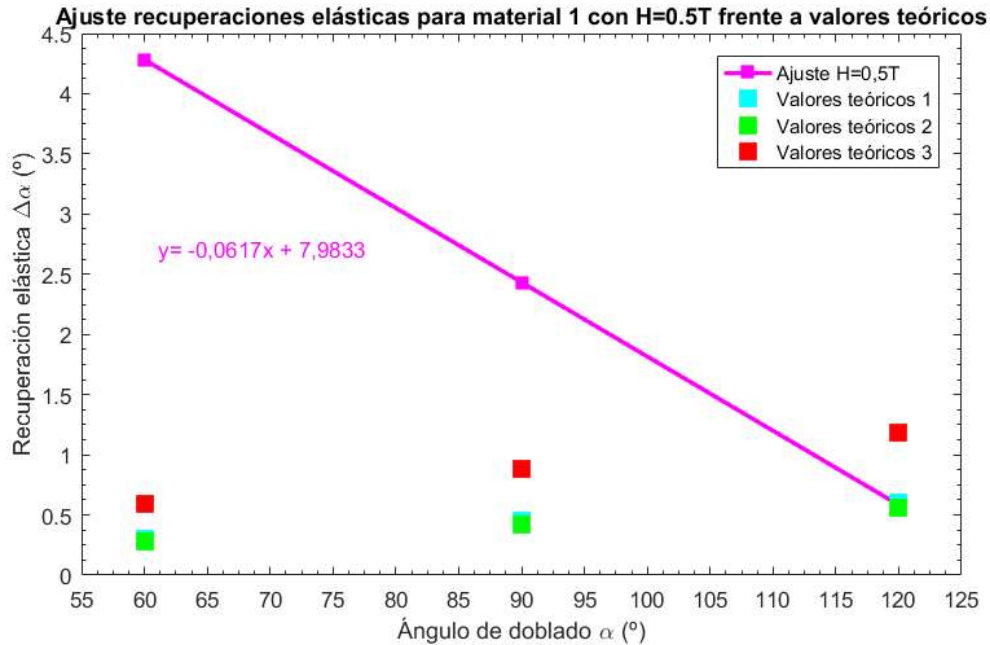
La literatura dice que, a medida que aumenta el ángulo de doblado, mayor es la restitución elástica, estando esta afirmación contrastada por las expresiones analíticas mostradas en el capítulo anterior. Por parte de los ensayos experimentales, los resultados no indican una clara influencia del ángulo de doblado sobre la restitución elástica, como puede observarse en la gráfica 4.4, donde para el material 1 se produce una bajada del ángulo de doblado a medida que aumenta α_i para todas las holguras, salvo para aquella que es 0,75 veces T. El ajuste de los resultados experimentales se ha hecho a partir de rectas de primer grado.

Con el objetivo de contrastar los resultados anteriores lo idóneo sería estudiar la influencia del ángulo de doblado para el resto de los materiales, sin embargo, esto no es posible debido a que el único material en el que se tienen probetas de los 3 ángulos ensayados es el material 1 y no se cumple la teoría de que, a mayor ángulo de doblado, mayor recuperación elástica.



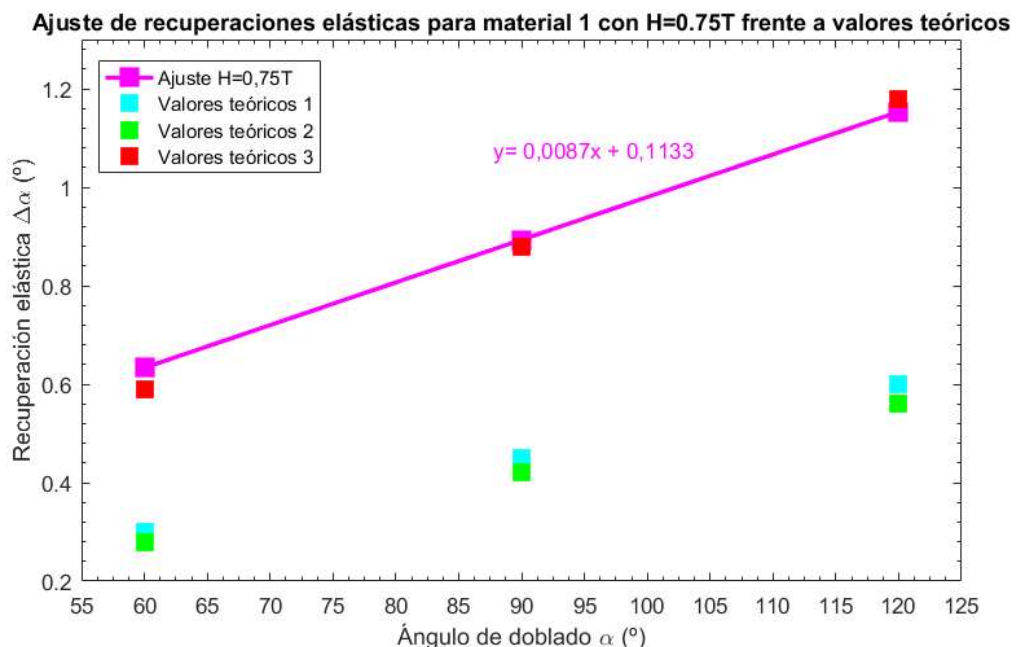
Gráfica 4.4. Valores de recuperación elástica para material 1 y todos los ángulos y holguras.

Comparando gráficamente los ensayos experimentales con los teóricos para el material 1 con $H=0,5T$ (gráfica 4.5), se puede apreciar la clara discrepancia entre ambos resultados, no solo variando de manera diferente, sino también con una clara diferencia de magnitud.



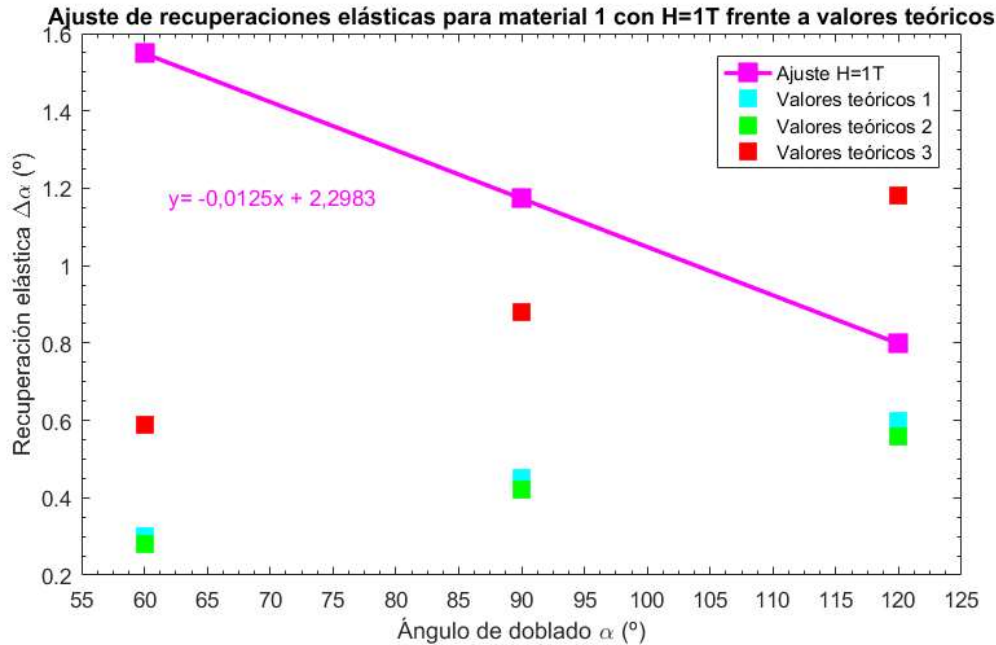
Gráfica 4.5. Recuperaciones elásticas para material 1 con H=0,5T junto a valores teóricos.

En el siguiente caso posible variando la holgura para el mismo material a 0,75T, (gráfica 4.6), salta a la vista un caso completamente opuesto al mostrado anteriormente, no solo la variación se da de la misma manera, o sea que ángulo de doblado inicial y ángulo de recuperación elástica son directamente proporcionales, si no que los valores teóricos para la expresión 2.20 se aproximan bastante con los resultados experimentales, a diferencia de las otras dos expresiones.



Gráfica 4.6. Recuperaciones elásticas para material 1 con H=0,75T junto a valores teóricos.

Para el siguiente y último caso del material 1, con H=1T, la tendencia es la misma que para H=0,5T, aunque en este caso la diferencia entre magnitudes no es tan acusada.



Gráfica 4.7. Recuperaciones elásticas para material 1 con H=1T junto a valores teóricos.

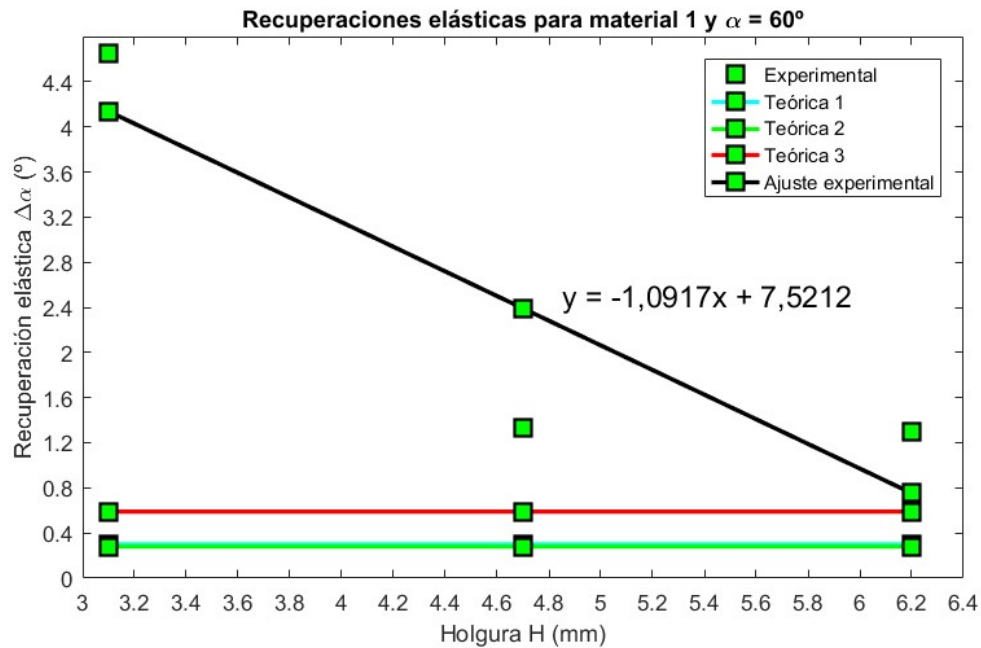
Algunas posibles causas de las anomalías citadas anteriormente pueden ser debidas a que las probetas no fueron ensayadas bajo las mismas condiciones, probablemente consecuencia de las tensiones residuales, pudiendo influenciar estas en los resultados de la recuperación elástica, entre otras razones. Por otra parte, la máquina utilizada no estaba concebida originalmente para este tipo de ensayos, ya que no era configurable en holgura, por lo que se tuvo que modificar para que estos ensayos fueran posibles realizarlos.

4.3.3 Influencia de la holgura sobre la recuperación elástica

Se puede observar en las gráficas de 4.8 a 4.14 una cierta tendencia a la baja de la restitución elástica a medida que se aumenta la holgura, para un mismo material y ángulo de doblado, salvo para el material 4. Este comportamiento coincide con el análisis realizado por Chikalthankar et al. [36].

En las gráficas de 4.8 a 4.15, se han ajustado los datos experimentales a ecuaciones de primer grado, en aquellas donde ha sido posible, ya que para algunos ángulos y materiales gran parte o todas las probetas habían fracturado. Es vital tener en cuenta que algunas probetas, a pesar de no haber fracturado completamente, sí que lo han hecho parcialmente permaneciendo ambas partes unidas.

En la gráfica 4.8, el comportamiento es el descrito anteriormente, donde el ángulo de recuperación elástica y la holgura aplicada son inversamente proporcionales. No obstante, los resultados teóricos se alejan mucho de parecerse a los resultados experimentales, siendo la ecuación 2.20 para el cálculo de $\Delta\alpha$ la que más se acerca.



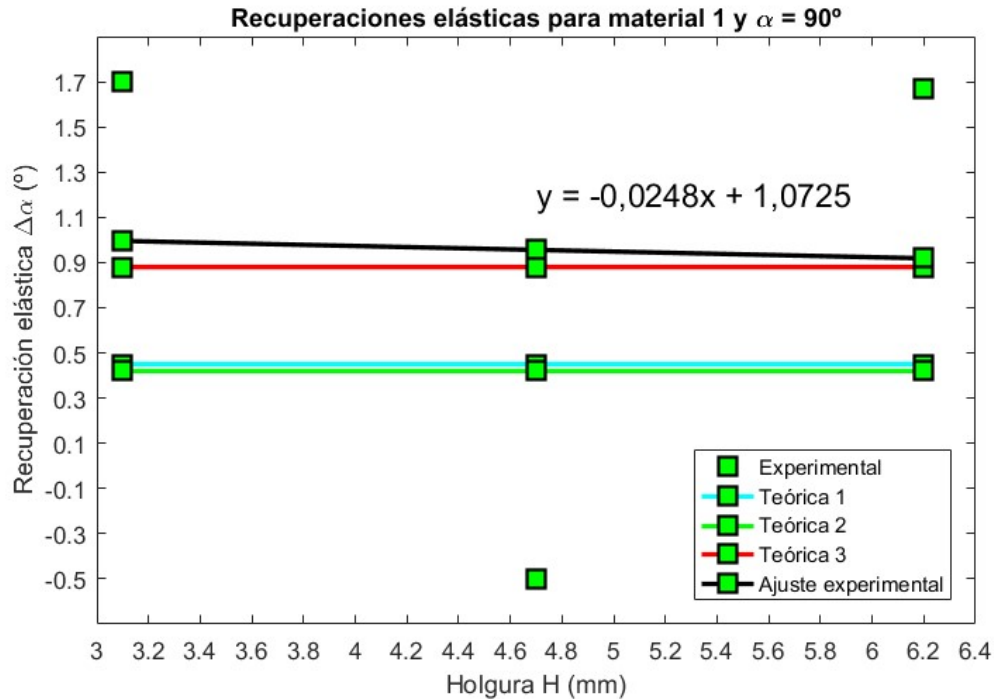
Gráfica 4.8. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 1 y ángulo inicial de 60°.

En la figura 4.83 se adjunta una imagen con las 3 probetas ensayadas para la gráfica 4.8, donde se puede observar la ausencia de grietas en el material, aunque si es perceptible el aumento del efecto Poisson sobre las probetas a medida que se aumenta la holgura. Por otra parte, el efecto *wrinkling* es observable en las probetas 2 y 3, a diferencia de la probeta 1 donde apenas es visible dicho efecto.



Figura 4.83. Probetas 1, 2 y 3 para la representación de las recuperaciones elásticas según la gráfica 4.8.

Para la gráfica 4.9, que pertenece al caso del material 1 y ángulo de doblado 90°, la tendencia es la misma que para 60°, donde $\Delta\alpha$ y H son inversamente proporcionales según el ajuste realizado. A pesar de ello, la variación es menos acusada, ya que la pendiente del ajuste es mucho menor que para $\alpha_i=60^\circ$, e incluso llegándose a parecer bastante los resultados teóricos para la ecuación 2.20 con el ajuste de los resultados experimentales.



Gráfica 4.9. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 1 y ángulo inicial de 90° .

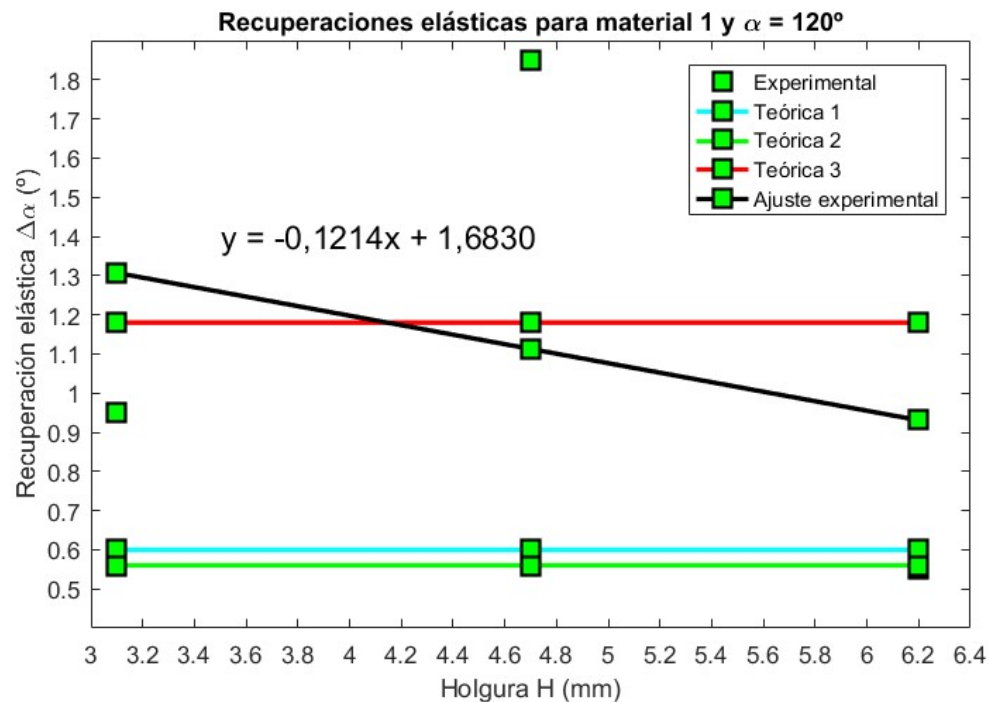
El valor de recuperación elástica para $H=4,7$ mm, es anómalo según el comportamiento esperado para el material, ya que debería ser de recuperación elástica positiva y esta es negativa.

Si se aprecian las 3 probetas de la figura 4.84, probetas 4, 7 y 8, se puede ver como la superficie de sus radios de curvatura están agrietadas, siendo la que más la probeta 7. Por otra parte, el efecto Poisson es más acusado en la probeta 7, así como el efecto *wrinkling*, pero variando poco frente al resto. Lo normal sería que, al aumentar la holgura, tanto el agrietamiento como el efecto Poisson y *wrinkling* sean mayores, sin embargo, en este caso no se cumple, probablemente debido a que la probeta 7 no fue ensayada bajo las mismas condiciones que las otras dos probetas (tensiones residuales, holguras de la máquina de doblado, etc.).



Figura 4.84. Probetas 4, 7 y 8 para la representación de la recuperación elástica según la gráfica 4.9.

Con un ángulo de doblado de 120° , el comportamiento del material es el mismo que en los dos casos anteriores, destacando este debido a que la recta que ajusta los resultados experimentales está la mayor parte del intervalo de la holgura por debajo de los valores teóricos para la ecuación 2.20 (gráfica 4.10). A pesar de ello, la expresión 2.20 sigue siendo la que más se asemeja a la realidad con los resultados experimentales.



Gráfica 4.10. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 1 y ángulo inicial de 120° .

Para el ensayo a 120° no se dan valores con recuperación elástica negativa, sin embargo, dos de ellos son aparentemente más bajos que los que se han dado para los otros ángulos de doblado con el material 1. Esto puede poner en evidencia el efecto predominante de la holgura sobre el ángulo de doblado, ya que a pesar de ser mayor α_i , el valor mínimo no negativo de recuperación elástica para el material 1 se da para una probeta doblada a 120° (probeta número 11, $\Delta\alpha_{\text{exp}} = 0,55^\circ$), pero con la mayor holgura posible en los ensayos, $H=1T$.

Resalta el hecho de que se dé un valor de recuperación elástica negativo para el material 1 a 60° y no para el mismo ensayo, pero a 120° . Es probable que no se produzca debido a que al ser mayor el ángulo de doblado, la zona traccionada del material sea mayor respecto al ensayo a 60° .

Al aumentar el ángulo de doblado, la línea neutra se desplaza hacia el interior, ya que el radio de plegado es menor, y tal como se puede observar en la ecuación 2.5, en dicho caso la posición de la línea neutra disminuye, de tal manera que el material tiene más área traccionada y menos área a compresión. Si la hipótesis realizada es cierta, entonces aquellas probetas que hayan sufrido fractura parcial por la zona de doblado, mientras mayor sea el ángulo de doblado, menor repercusión tendrá la rotura sobre la recuperación elástica (menor recuperación elástica negativa) debido al menor número de fibras a compresión.

Las probetas ensayadas en la gráfica 4.10 (figura 4.85), presentan una fractura bastante profunda en su radio de curvatura, lo cual puede ser la justificación por la que no se pueda apreciar diferencia entre las probetas relativo a efecto Poisson y al *wrinkling*.

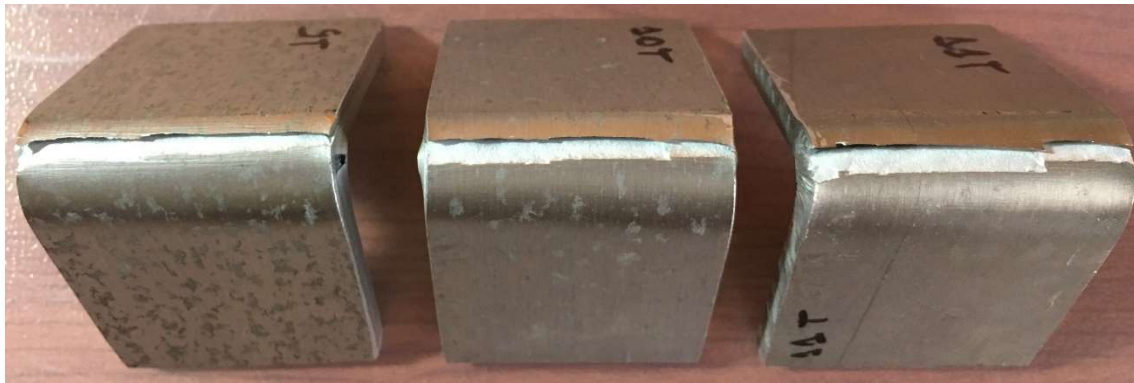
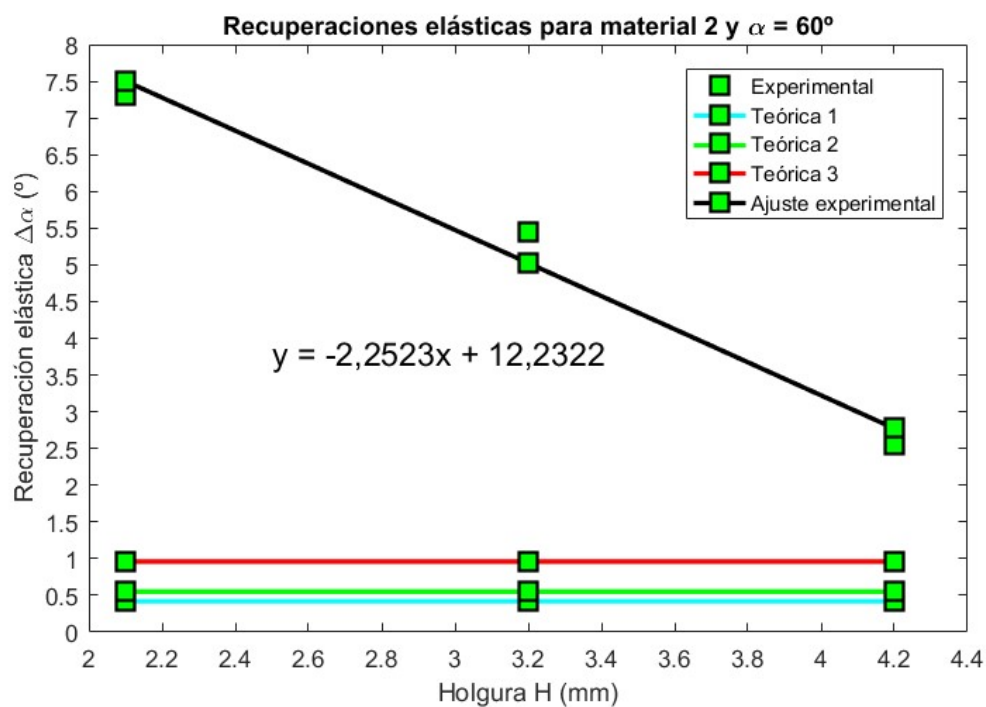


Figura 4.85. Probetas 9, 10 y 11 para la representación de la recuperación elástica según la gráfica 4.10.

Para la gráfica 4.11, correspondiente a los ensayos realizados al material 2 para $\alpha_i = 60^\circ$, los resultados experimentales se ajustan bastante mejor a una recta que en ocasiones anteriores. La tendencia es la misma que para el material 1, a mayor holgura, menor ángulo de recuperación elástica. Sin embargo, los valores teóricos siguen estando bastante lejos de los experimentales, aunque la ecuación 2.20 se asemeja mejor a los experimentales.



Gráfica 4.11. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 2 y ángulo inicial de 60° .

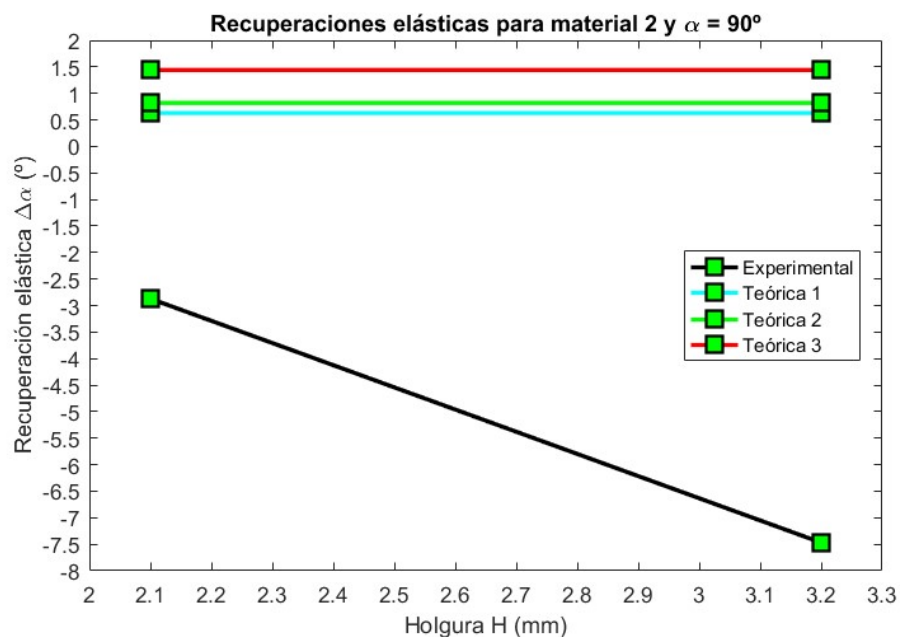
Este caso es un claro ejemplo del efecto de la holgura sobre el material, el cual se puede apreciar en la figura 4.86. A medida que aumenta la holgura, el agrietamiento del radio de curvatura es mayor, como consecuencia de un mayor esfuerzo sobre el material. Este fenómeno se analizará más adelante.



Figura 4.86. Probetas 12, 13 y 14 para la representación de la recuperación elástica según la gráfica 4.11.

Relativo al efecto Poisson, sí que se aprecia un claro aumento de este a medida que se aumenta la holgura, no pudiéndose realizar la misma conclusión en este caso para el *wrinkling*.

Por orden, el siguiente caso es el de la gráfica 4.12, donde las 2 probetas que se han podido ensayar, han arrojado valores de recuperación elástica negativa, fracturando por completo la probeta con $H=1T$. En la figura 4.87 se puede apreciar que las fracturas de aquellas dos que no lo han hecho por completo, son bastante profundas, manteniendo unido el material una fina capa de este. Se sigue cumpliendo el mismo patrón hasta ahora, a mayor holgura, menor recuperación elástica.



Gráfica 4.12. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 2 y ángulo inicial de 90° .

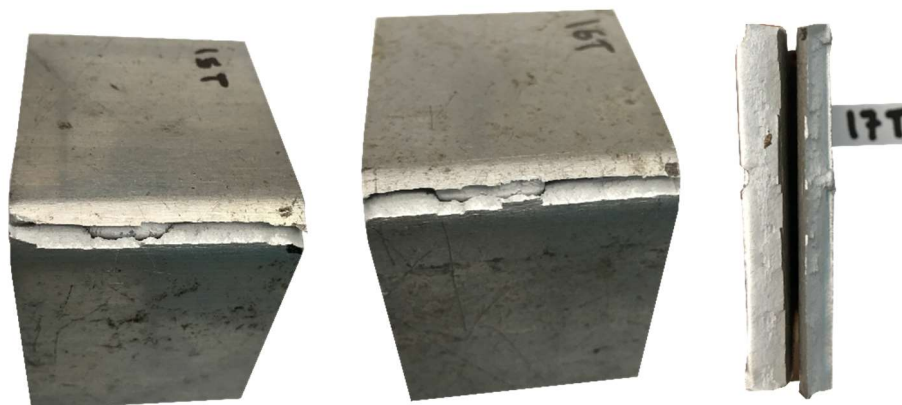
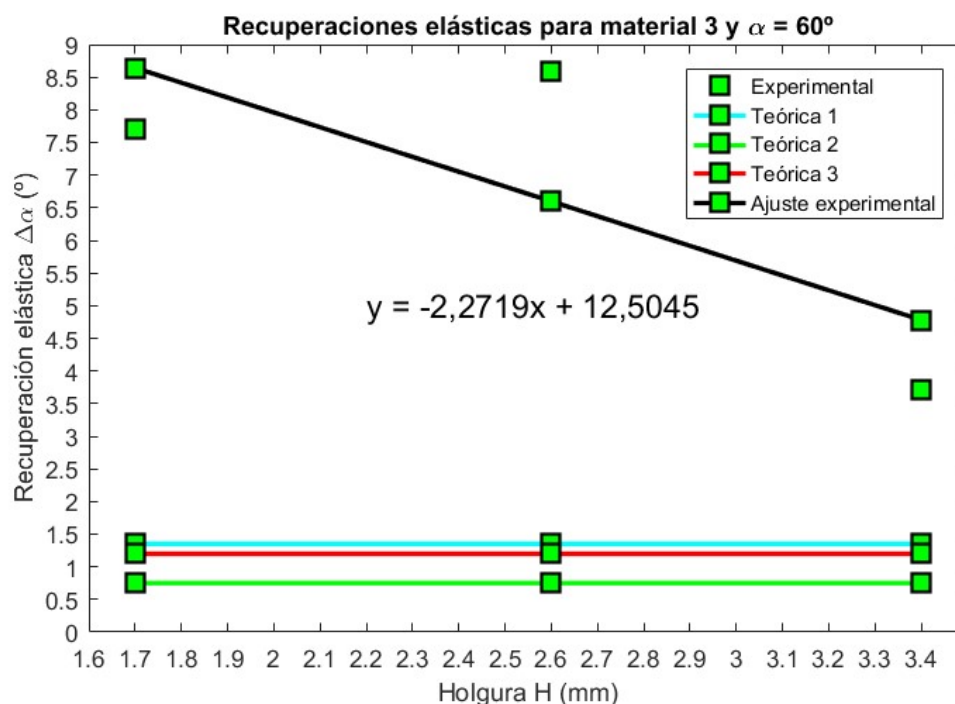


Figura 4.87. Probetas 15, 16 y 17 para la representación de la recuperación elástica según la gráfica 4.12.

La gráfica correspondiente a los valores de 120° para el material 2 no ha sido posible realizarla debido a que han fracturado todas las probetas ensayadas.

Relativo al material 3 con $\alpha_i=60^\circ$ (gráfica 4.13), de nuevo los valores de recuperación elástica disminuyen al aumentar H , no ajustándose muy bien los resultados experimentales a la recta. Lo novedoso de este caso, es que por primera (y única) vez, los valores teóricos $\Delta\alpha_1$ se acercan más a los valores experimentales que los de $\Delta\alpha_3$. Esto es debido a que, como se puede apreciar en la ecuación 2.20, esta no depende de K , mientras que la expresión 2.18 sí. Sumándole a ello que para el material 3 se da el máximo valor de K respecto al resto de materiales, siendo bastante la diferencia (ver tabla 4.22), es comprensible el comportamiento anterior.



Gráfica 4.13. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 3 y ángulo inicial de 60° .

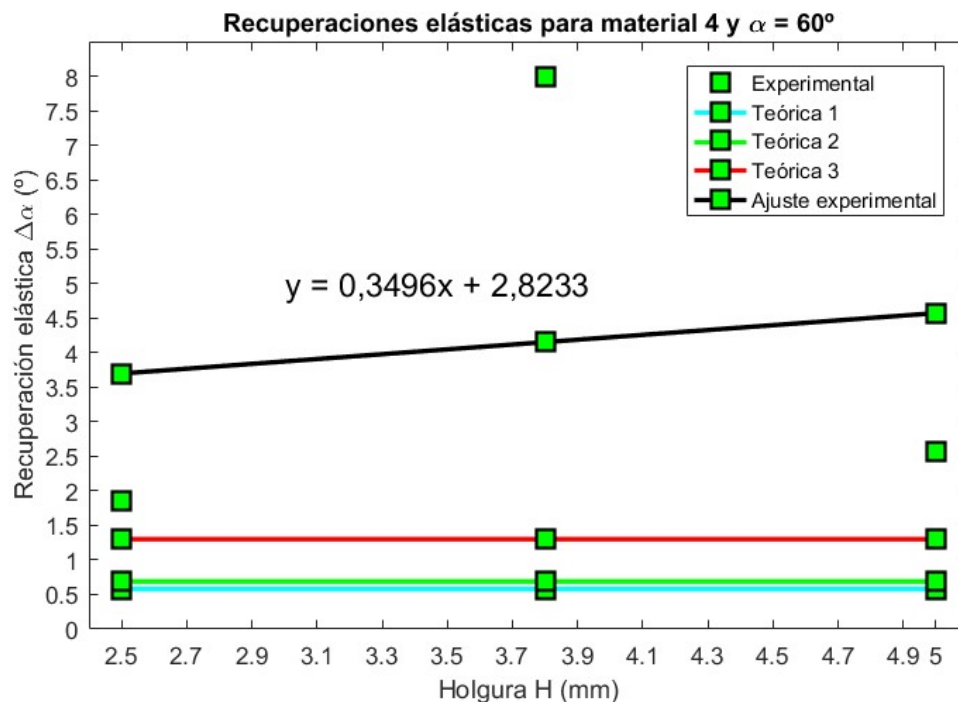
En la figura 4.88, no aparecen grietas sobre el material hasta que se ensaya la probeta con la máxima de las holguras elegidas, $H=1T$, mientras que el efecto Poisson y el *wrinkling* son apenas perceptibles para estas.



Figura 4.88. Probetas 21, 22 y 23 para la representación de la recuperación elástica según la gráfica 4.13.

Las probetas del material 3 para $\alpha_i=90^\circ$ fracturaron por completo, siendo imposible graficar sus resultados de recuperación elástica.

La gráfica 4.14 representa los valores de recuperación elástica para las probetas del material 4 con $\alpha_i = 60^\circ$, siendo este el material más duro de todos los ensayados, teniendo como prueba de ello la aparición de grietas con la menor de las holguras, $H=0,5T$ (figura 4.89)



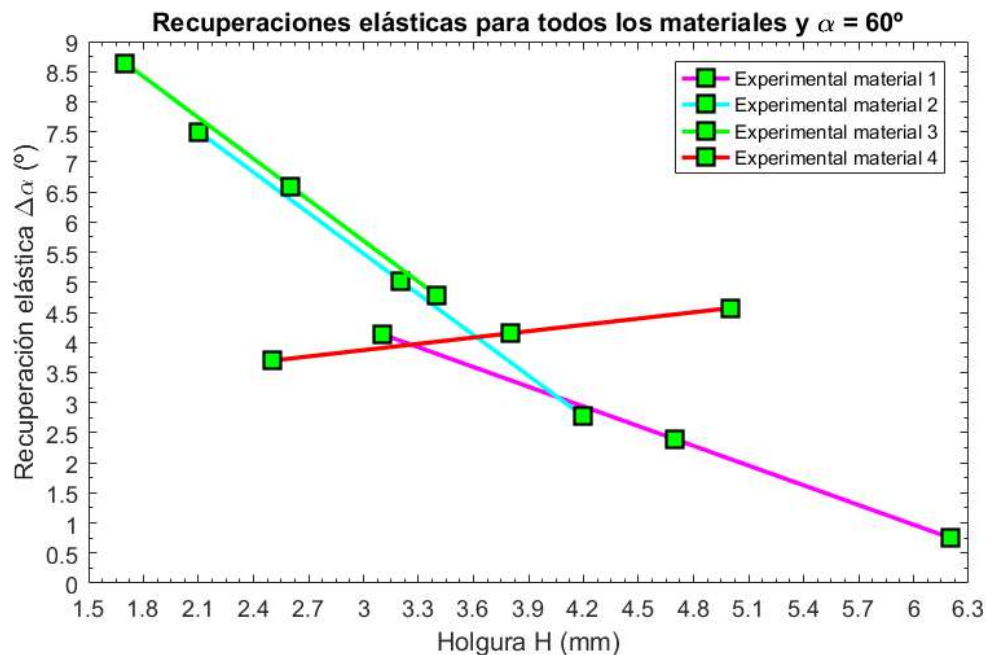
Gráfica 4.14. Comparativa de recuperaciones elásticas teóricas y experimentales para material 4 y ángulo inicial de 60° .



Figura 4.89. Probetas 27, 28 y 29 para la representación de la recuperación elástica según la gráfica 4.14.

El material 4 es el único donde no se corrobora lo visto en la teoría, ya que aumenta la recuperación elástica al aumentar la holgura, según el ajuste realizado a los puntos experimentales. Analizando las fracturas de las probetas de la figura 4.89, se ha observado que para las probetas 27 y 29, la fractura no sigue una progresión lineal, sino curva. Esta fractura anómala puede estar incentivada debido a una aplicación de las fuerzas no uniforme, debido a la mayor dureza del material y por lo tanto a la mayor complejidad del plegado a pesar de haber usado la barra auxiliar. Por otra parte, en las 3 probetas el efecto Poisson y el *wrinkling* apenas varía de unas a otras.

Para finalizar el estudio de la influencia de la holgura, se ha representado todos los ajustes realizados para todos los materiales en la gráfica 4.15, de tal manera de que se pueda tener una visión global de los experimentos.



Gráfica 4.15. Comparativa de recuperaciones elásticas experimentales para todos los materiales y ángulo inicial de 60° .

Aunque sería necesario realizar más ensayos bajo las mismas condiciones, se puede intuir que mientras mayor sea la holgura, menor es la recuperación elástica (gráfica 4.15), prevaleciendo la holgura sobre el ángulo de doblado. Buscando una posible explicación se podría pensar lo siguiente. Si tomamos momento respecto al punto A de la figura 4.90, mientras mayor sea la holgura, mayor será el momento aplicado sobre el material, ya que la distancia hacia el punto A será mayor.

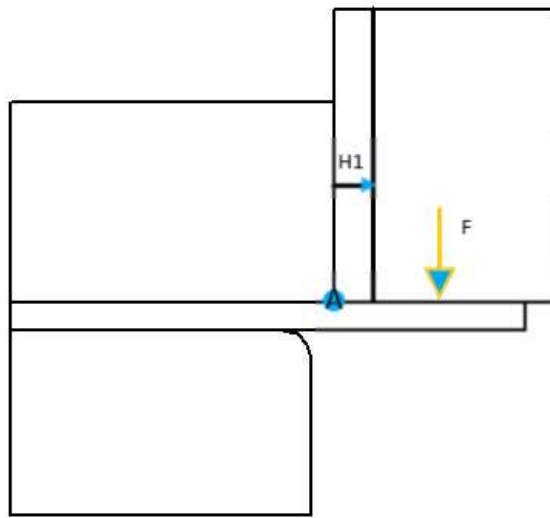


Figura 4.90. Momento aplicado sobre el material plegado.

Si el momento aplicado sobre la lámina es mayor, la cantidad de material que plastificará también será mayor, por lo que disminuiría la recuperación elástica. En la figura 4.90 se ha representado la fuerza F como la resultante de una distribución de fuerzas sobre toda la cara de la lámina.

Una prueba gráfica y experimental de lo anterior es la figura 4.91, donde se muestran 3 probetas del mismo material y dobladas al mismo ángulo, pero con holguras distintas, mostradas de menor a mayor holgura de izquierda a derecha respectivamente. Se puede apreciar como a medida que aumenta la holgura, la profundidad y la abertura de las fracturas aumenta, debido al mayor momento ejercido sobre el material.



Figura 4.91. Justificación del efecto de una mayor holgura sobre el material.

4.4 Radio de doblado

El fabricante de la máquina recomendaba como radio mínimo de doblado un valor de 1,5 veces el espesor del material (tabla 3.13), el cual no se cumple en ninguno de los casos para los ensayos realizados, debido a que $R_i=3$ mm, sin embargo, se escogió ese radio de acuerdo con la disponibilidad de materiales y herramientas del taller. Los valores de R_{\min} para cada material según el fabricante se pueden ver en la tabla 4.33.

Tabla 4.33. Radios mínimos de doblado según el fabricante para cada material.

R _{mín} según fabricante	
	R _{mín} [mm]
Material 1	9.3
Material 2	6.3
Material 3	5.1
Material 4	7.5

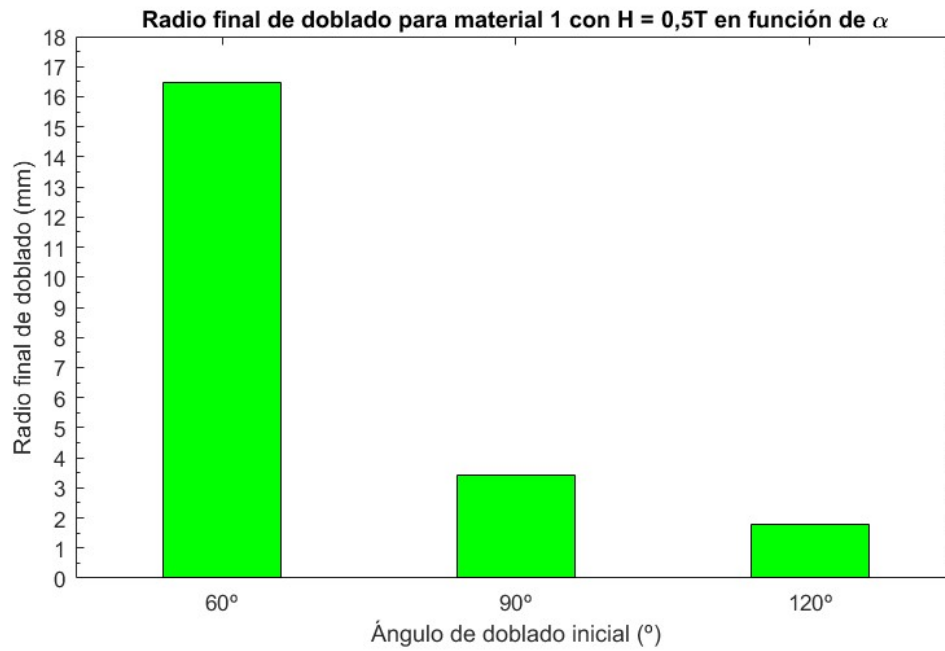
A pesar de lo anterior, al estar la máquina de doblado concebida para trabajar hierro, es factible pensar que la recomendación del fabricante sería más permisiva para el caso del aluminio, ya que es un material con mayor conformabilidad respecto al hierro. Kalpakjian, en su libro [1] realiza una recomendación sobre el radio mínimo de doblado para el aluminio, encontrándose este entre 0 veces el espesor para aluminios blandos (lo que significa que el material podría doblarse sobre sí mismo) y 6 veces el espesor para aluminios duros. Por parte del acero, el inoxidable tendría un radio mínimo entre 0,5 veces el espesor y 6 veces el espesor, de manera que el rango de plegado es más amplio por norma general para aluminios que para aceros.

Sin embargo, son numerosas las fracturas de probetas que se han producido durante los ensayos, como demuestra la figura 3.82, por lo que el radio de plegado inicial debería ser mayor. Por otro lado, hay que tener en cuenta también la dureza de los materiales, debido a que para el material 1, pese a tener el radio mínimo de doblado más restrictivo, ha sido posible ensayar todas sus probetas para todos los ángulos de doblado, gracias a que es el material con menor dureza.

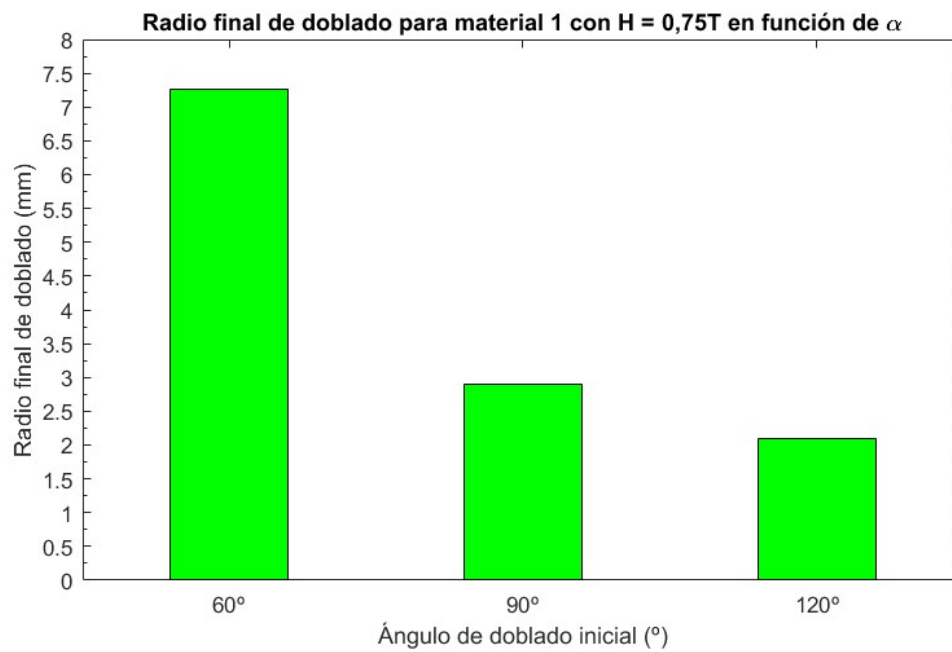
4.4.1 Análisis de radios de doblado finales

Ahora se va a analizar la evolución de los radios de doblado finales para los distintos ángulos de doblado con cada una de las 3 holguras estudiadas (solo para el material 1).

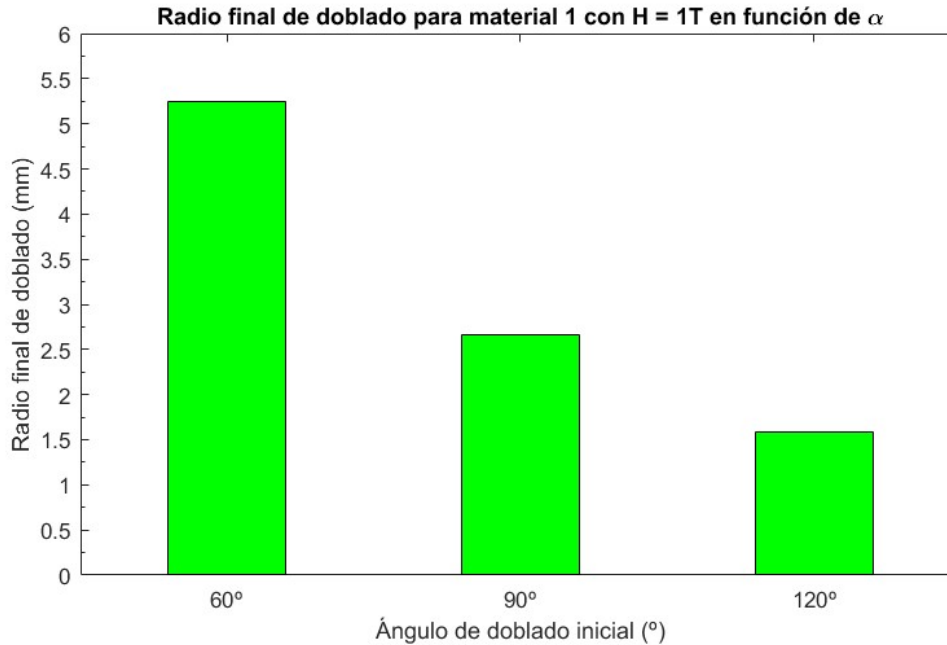
En las gráficas de 4.16 a 4.18, se puede observar el mismo patrón de comportamiento en todas ellas, ya que, a medida que aumenta el ángulo de doblado, disminuye el radio de doblado, lo cual concuerda con la teoría. Sin embargo, resalta el cambio tan brusco que se produce en el radio de doblado para $H=0,5T$ de 60° a 90° , siendo la diferencia entre ambos valores de 13,02 mm, para luego pasar a 120° sin apenas variar el radio de doblado en comparación.



Gráfica 4.16. Radios finales de plegado para material 1 con $H=0,5T$.



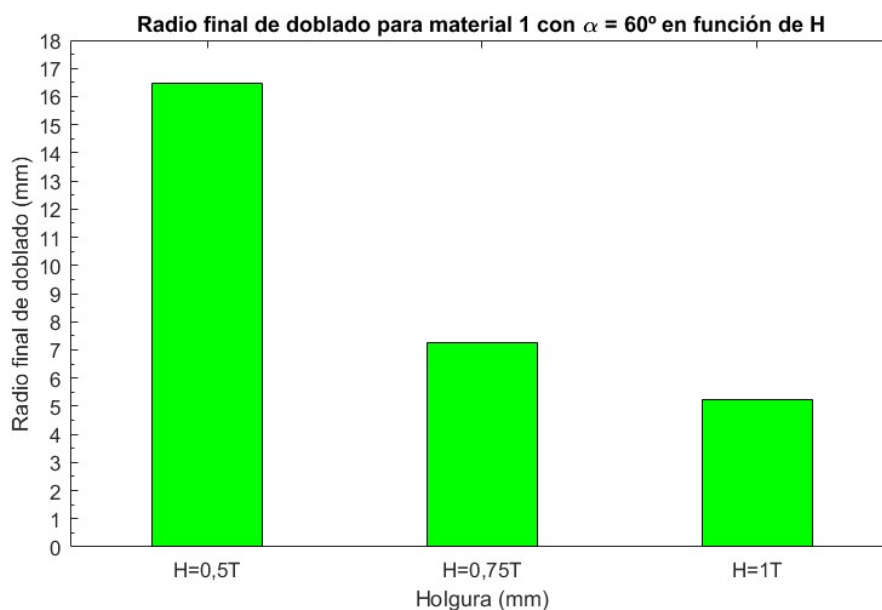
Gráfica 4.17. Radios finales de plegado para material 1 con $H=0,75T$.



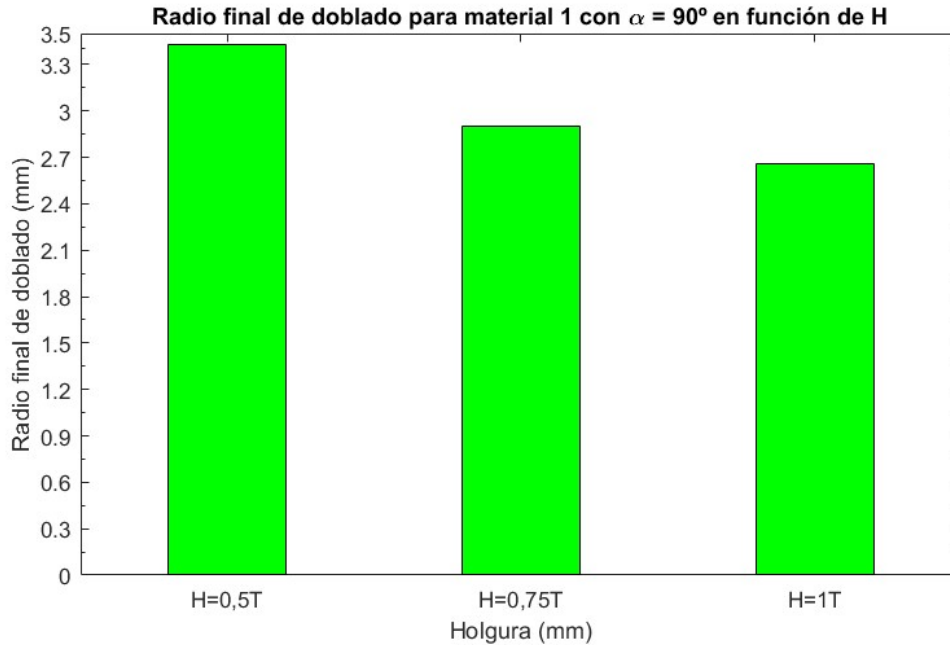
Gráfica 4.18. Radios finales de plegado para material 1 con $H=1T$.

Para el ensayo con $H=0,75T$ (gráfica 4.17) se produce un comportamiento parecido al de $H=0,5T$ (gráfica 4.16) pero con una disminución de R_f menos abrupta entre 60° y 90° , siendo la evolución todavía más progresiva para $H=1T$ (gráfica 4.18). De esta manera los ensayos experimentales anteriores denotan que, a pesar de cumplirse a teoría, dicha evolución no es lineal.

A continuación, se va a analizar la influencia de la holgura sobre el radio final de plegado para el único material donde es posible analizar todos los ángulos, material 1. La evolución para 60° y 90° es clara, a medida que aumenta la holgura, disminuye el radio final de doblado (gráficas 4.19 y 4.20), lo cual concuerda con la teoría. Como se comentó anteriormente, a mayor holgura mayor esfuerzo se realiza sobre el material, por lo que menor será el ángulo de doblado.

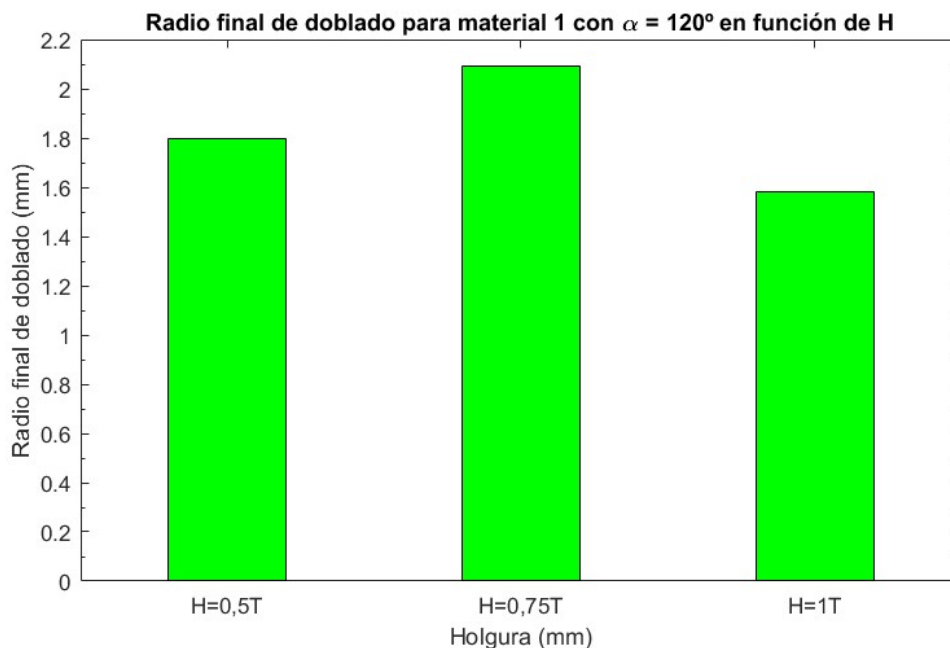


Gráfica 4.19. Radios finales de doblado para material 1 a 60° .



Gráfica 4.20. Radios finales de doblado para material 1 a 90°.

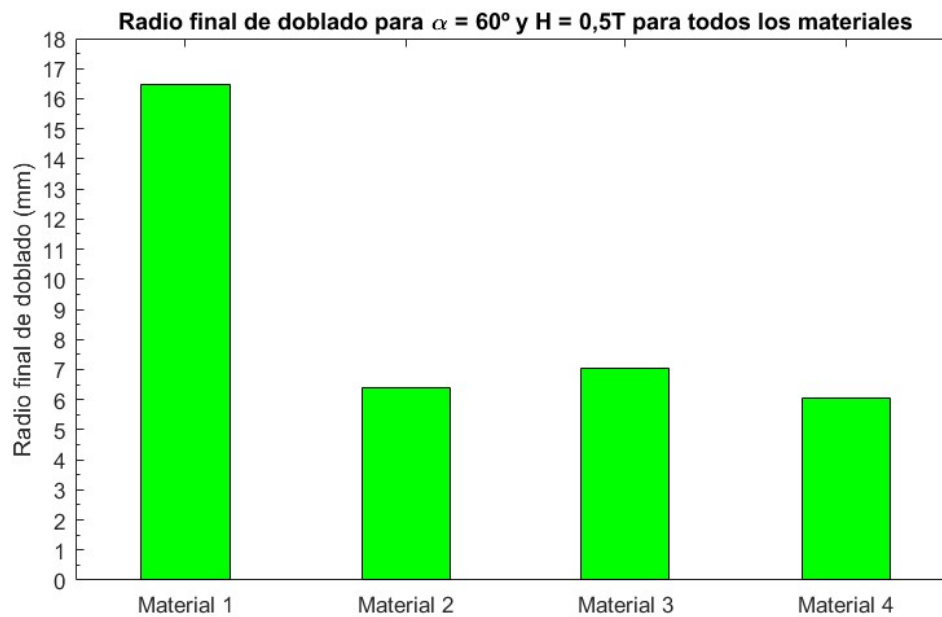
A pesar de lo anterior, este tipo de comportamiento no se da para $\alpha_i = 120^\circ$ (gráfica 4.21), ya que evoluciona de manera diferente.



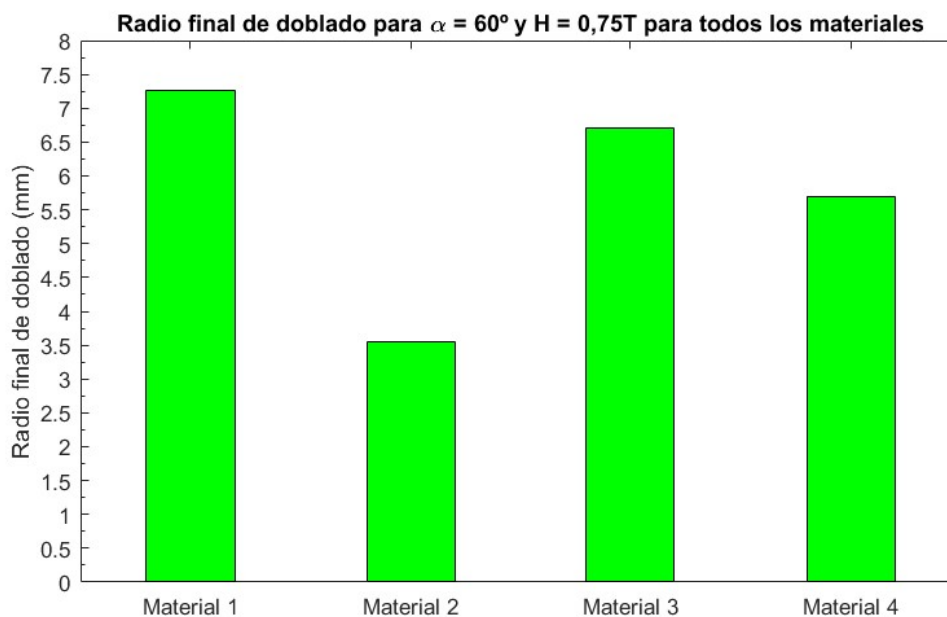
Gráfica 4.21. Radios finales de doblado para material 1 a 120°.

La respuesta ante el comportamiento singular que se da para $\alpha_i = 120^\circ$ puede estar en la notable fractura que se produce para las 3 probetas en su radio de curvatura. Tal y como se comentó anteriormente, una posible causa puede ser que la fractura parcial del radio de curvatura por su parte más externa haga que fibras que antes estaban traccionadas dejen de estarlo, aunque no ha sido contrastada dicha hipótesis.

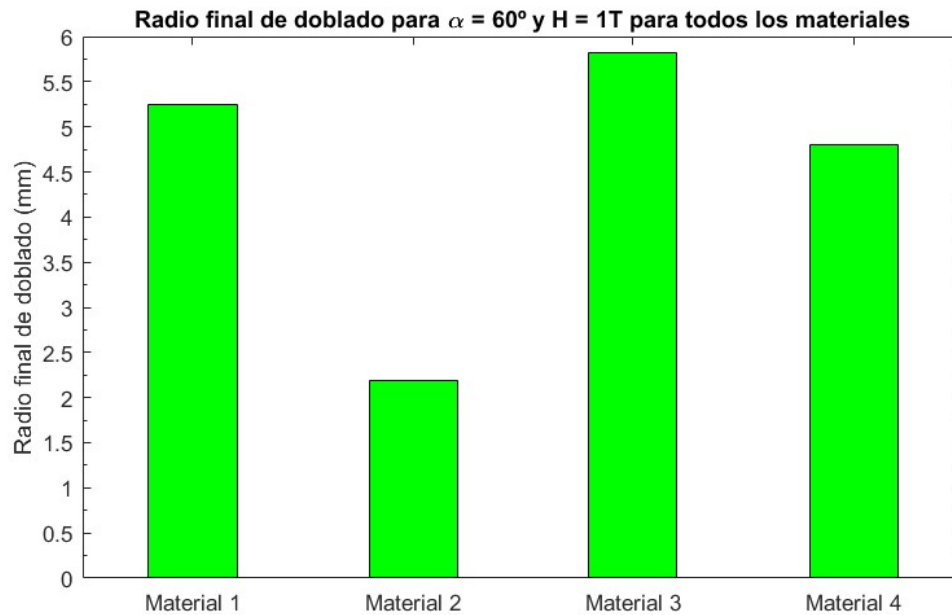
Por último, para finalizar el análisis de los resultados experimentales, se han graficado de 4.22 a 4.24 diagramas de barras con los valores de radio de doblado final para cada uno de los materiales, fijando el ángulo de doblado y la holgura.



Gráfica 4.22. Radios finales de doblado para $H=0,5T$ y 60° .



Gráfica 4.23. Radios finales de doblado para $H=0,75T$ y 60° .



Gráfica 4.24. Radios finales de doblado para $H=1T$ y 60° .

Observando los gráficas se puede apreciar como los radio de doblado mayores, en términos medios, se dan para el material 1, seguido del material 3, material 4 y en último lugar el material 2 ($R_{f1} > R_{f3} > R_{f4} > R_{f2}$).

En principio no hay ningún parámetro del material que prevalezca sobre los demás y permita contrastar su influencia sobre el material, por lo que no es posible destacar ningún comportamiento.

5 CONCLUSIONES

Se pretende en este capítulo expresar de manera clara aquellas conclusiones sacadas a raíz de los experimentos realizados:

- La línea neutra tiende a encontrarse más cerca del radio interior de doblado. Se ha demostrado tanto experimentalmente como analíticamente que la línea neutra para los casos estudiados se encuentra en el interior del radio de curvatura, por lo que se puede decir que de manera general se produce dicha situación, salvo que el espesor sea muy pequeño, en cuyo caso suele ser válida la hipótesis de que la línea media coincide con la línea neutra.
- La recuperación elástica al completo para aluminio se produce después de 24 h tras el plegado. Tras dibujar la silueta de las probetas ensayadas 24 y 48 horas después de su plegado se visualizaba que en la mayoría de los casos apenas variaba la recuperación elástica y en aquellos casos en los que variaba lo hacía de manera despreciable.
- Al aumentar el espesor del material a plegar, menor es la recuperación elástica. Se concluyó experimentalmente dicha afirmación después de que para todos los casos estudiados donde ha sido posible contrastar probetas de los 4 materiales, el material con probetas de menor espesor (material 3), tenga las mayores recuperaciones elásticas comparadas con los otros materiales.
- A medida que se aumenta la holgura en el doblado con dado deslizante, disminuye la restitución elástica. A través de los ensayos realizados, ha sido posible verificar las hipótesis teóricas sobre la holgura, disminuyendo la recuperación elástica a medida que se aumenta la holgura en doblado con dado deslizante para todos los materiales, salvo para el material 3.
- Mientras mayor sea la holgura aplicada sobre el material en doblado con dado deslizante, mayor será el efecto Poisson y *wrinkling*. Ha sido posible observar el efecto de la holgura sobre el material a partir del material ensayado, ya que en algunos casos era bastante evidente la influencia y evolución de dichos efectos al aumentar la holgura.
- El radio de doblado disminuye mientras se aumente el ángulo de doblado, produciéndose dicha evolución de manera no lineal.

En este capítulo se pretende exponer aquellas ideas, que por falta de tiempo y/o medios no han sido posibles investigar, contrastar o verificar, introduciéndolas aquí para quien desee continuar con este trabajo.

6.1 Propuestas de mejora

- Caracterización de los materiales: con el objetivo de obtener un mayor número de datos de los materiales ensayados, se sugiere realizar ensayos de tracción a los mismos.
- Mejoras en la máquina de doblado: debido a las numerosas holguras presentadas en la máquina de doblado, algunas veces el plegado era impreciso, por ello se propone terminar de arreglarla ya que el tope del dado deslizante en su parte inferior se encontraba dañado.
- Fabricar matrices con distintos radios de doblado para ver el efecto del radio inicial de doblado sobre la recuperación elástica.
- Realizar expresiones empíricas que tengan en cuenta el efecto de la holgura sobre la recuperación elástica, a partir de la realización de más ensayos que tengan en consideración una mayor casuística con más parámetros.

1. Kalpakjian, S. y Schmid, S.R. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Quinta edición. México. Pearson Educación.
2. Salazar López, B. (2016). *Herramientas para el ingeniero industrial: procesos de conformado*. Recuperado el 16 de junio de 2018, de <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/procesos-industriales/procesos-de-conformado/>
3. Montes J.M., Cuevas F.G. y Cintas J. (2014). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Primera edición. España. Paraninfo.
4. Özdemir, M. (2017). Mathematical Modeling of the Effect of Different Parameters on Spring Back in Sheet Metal Formability Process. *American Journal of Engineering Research*, 6, 10, 198-205.
5. Trzepieciniski, T. y Lemu, H.G. (2017). Prediction of springback in V-die air vending process by using finite element method. *MATEC Web of Conferences*, 121, 03023.
6. Trzepieciniski, T. y Lemu, H.G. (2017). Effect of Computational Parameters on Springback Prediction by Numerical Simulation. *Metals*, 7, 380.
7. Kalpakjian, S. y Schmid, S.R. (2014). *MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA: Ingeniería y tecnología de materiales*. Vol.1. Séptima edición. México. Pearson.
8. Desconocido. (s.f.). *V-bending*. Recuperado el 18 de junio de 2018 de <https://www.quia.com/jg/1961560list.html>
9. Prasanna, M.N. (2013). *Sheet metal-operations*, Recuperado el 18 de junio de 2018 de https://www.slideshare.net/prasanna_mn/sheet-metaloperations
10. Censa Industrial. (s.f.). *Doblado en V y Doblado de Bordes*. Recuperado el 18 de junio de 2018 de https://censaindustrial.com/blog_post.php?id=208
11. Desconocido. (s.f.). *Sheet Metal Bending*. Recuperado el 19 de junio de 2018 de http://thelibraryofmanufacturing.com/sheetmetal_bending.html
12. MIPSAs. (2018). *Plegado estándar*. Recuperado de <https://mipsa.com.mx/dotnetnuke/Procesos/Plegado-estandar>
13. Agranjo-Trabajo propio, CC BY-SA 4.0. (2011). *Dobladora*. Recuperado de <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14834353>
14. Agranjo-Trabajo propio, CC BY-SA 4.0. (2011). *Doblado punzón-matriz*. Recuperado de <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14834332>
15. ROLLER®. (2016). *Bending Types-Air Bending (or Partial Bending)*. Recuperado el 19 de junio de 2018, de <http://www.rollerusa.com/resources/bending-types-air-bending-partial-bending/>
16. Molinero, C. (2005). *Plegado de chapa con un punzón y una matriz*. Recuperado el 21 de junio de 2018, de <http://www.interempresas.net/Deformacion-y-chapa/Articulos/10300-Plegado-de-chapa-con-un-punzon-y-una-matriz.html>
17. Groover, M.P. (2007). *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA: Materiales, procesos y sistemas*. Tercera edición. México. McGraw-Hill Interamericana.
18. Chen, L., Chen, H., Guo, W., Chen, G. y Wang, Q. (2014). Experimental and simulation studies of springback in rubber forming using aluminium sheet straight flanging process. *Materials and Design*, 54, 354-360. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913007942?via%3Dihub>
19. Molera Solà, P. (1990). *Metales resistentes a la corrosión*. Barcelona. Marcombo.

20. Torres Hernández, Y. (s.f.). Apuntes de la asignatura Tecnología de Materiales, bloque I: aleaciones metálicas y su procesado, tema 15: moldeo, deformación plástica, pulvimetalurgia y procesos de unión.
21. Graham, responsable de formación y servicios de Seco Tools. (s.f.). *Identificación y solución de ocho tipos de problemas habituales en las plaquitas*. Recuperado de http://www.revistatope.com/195_art_SECO_TOOLS_Herramientas.html
22. Martín Sanz, M.A. (2013). *Puesta a punto de una máquina Erichsen manual de embutición de chapa e implementación de prácticas de laboratorio* (trabajo fin de carrera). Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60167/direccion/PFC+Miguel+Angel+Martin+Sanz%252F>
23. Aguillón Centeno, A. (s.f.). *Práctica 1 ductilidad* (práctica). Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/71972449/practica-1-ductilidad>
24. ASTM E2218-15. (2015). *Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/E2218.htm>
25. Orlando Tolaba, R. (2017). *Base metodológica para determinar la curva límite de conformado, en chapas de acero de bajo carbono* (proyecto). Recuperado de <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/5197/PROYECTO%20INTEGRADOR%20-%20RENE%20TOLABA.pdf?sequence=1>
26. Pérez González, A. (2018). *Coeficiente de Poisson*. Recuperado el 25 de junio del 2018, de http://www.mecapedia.uji.es/coeficiente_de_Poisson.htm
27. Benson, S. (2014). *Aspectos generales del doblado: los fundamentos del doblado pesado*. Recuperado el día 25 de junio del 2018, de <https://www.thefabricator.com/spanish/aspectos-generales-del-doblado-los-fundamentos-del-doblado-pesado>
28. THE ATLAS GROUP. (2013). *Overview of Stretch Forming*. Recuperado el 26 de junio del 2018, de <http://theatlasgroup.biz/overview-stretch-forming/>
29. CENSA INDUSTRIAL. (2018). *Tips: Doblado a fondo de Aluminio*. Recuperado el 26 de junio del 2018, de https://censaindustrial.com/blog_post.php?id=100
30. Chandramouli, R. (s.f.). *Sheet metal operations-Bending and related processes*. SASTRA University, Thanjavur-613 401. Recuperado de http://nptel.ac.in/courses/112106153/Module%207/Lecture%202/Module_7_Sheet_Metal-Forming-Lecture_2.pdf
31. SURPLEX. (s.f.). *Prensa plegadora hidráulica MEBUSA PH90/30S*. Recuperado de <https://www.surplex.com/es/m/7/prensa-plegadora-hidraulica-mebusa-ph9030s-455933.html>
32. DISMA. (s.f.). *CATÁLOGO DISMA TRIS DISMA A/SUPER. MÁQUINAS PARA A FORJA ORNAMENTAL*. Recuperado de <http://www.bibut.com/archivosbd/anuncios/files/a1c417a4bef695d8b1f622b30705a5f7.pdf>
33. ASM Aerospace Specification Metals Inc. (s.f.). *Aluminium 7475-T761*. Recuperado el 20 de junio de 2018, de <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7475T761>
34. ABRATOOLS. s.a. (s.f.). *SIERRA DE CINTA BF 120 SCV*. Recuperado de <http://www.abratools.es/TRONZADORA-DE-SIERRA-DE-CINTA-BF-120-SCV>
35. Dametew, A.W. y Gebresenbet, T. (2017). Study the Effects of Spring Back on Sheet Metal Bending using Mathematical Methods. *Journal of Material Sciences & Engineering*, 6:5. doi: 10.4172/2169-0022.1000382.
36. Chikalthankar, S.B., Belurkar, G.D. y Nandedkar V.M. (2014). Factors Affecting on Springback in Sheet Metal Bending: A Review. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, ISSN:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.676.6809&rep=rep1&type=pdf>

37. Mahr, (s.f.). *MARAMETER 838 EA PALPADOR ELECTRÓNICO DE EXTERIORES*. Recuperado el 9 de julio del 2018, de <https://www.mahr.com/es/Prestaciones/Metrolog%C3%ADa-industrial/Productos/Metrolog%C3%ADa-manual/MaraMeter---Aparatos-de-medici%C3%B3n-indicadores/MaraMeter---Aparatos-de-medici%C3%B3n-con-brazo-de-palpado/MaraMeter-838-EA--Palpador-electr%C3%B3nico-de-exteriores/>
38. Grupo MONPEX. (s.f.). *Aleación aluminio 5083*. Recuperado el 10 de julio del 2018, de <https://monpex.com/wp-content/uploads/GrupoMonpex-AleacionAluminio5083.pdf>
39. Matmatch GmbH. (2018). Recuperado de <https://matmatch.com/>
40. © AENOR UNE-EN ISO 7200:2004. (2004). *Documentación técnica de productos. Campos de datos en bloques de títulos y en cabeceras de documentos (ISO 7200:2004)*. Recuperado de https://portal--aenormas--aenor--com.us.debiblio.com/aenor/Suscripciones/Personal/pagina_per_buscador.asp
41. © AENOR UNE-EN ISO 5457:2000. (2000). *Documentación técnica de producto. Formatos y presentación de los elementos gráficos de las hojas de dibujo (ISO 5457:1999)*. Recuperado de https://portal--aenormas--aenor--com.us.debiblio.com/aenor/Suscripciones/Personal/pagina_per_buscador.asp
42. © AENOR UNE-EN ISO 1027:1995. (1995). *Dibujos técnicos. Plegado de planos*. Recuperado de https://portal--aenormas--aenor--com.us.debiblio.com/aenor/Suscripciones/Personal/pagina_per_buscador.asp
43. Demaquinasyherramientas. (2014). *Introducción a los discos abrasivos*. Recuperado el 17 de julio del 2018, de <http://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-electricas-y-accesorios/discos-abrasivos-tipos-y-usos>
44. OSTLING. (s.f.). *Electrolytic Marking*. Recuperado el 19 de julio de 2018, de <https://www.ostling-markingsystems.com/products/electrolytic-marking/>
45. Vidal Gómez, E. (2013). *Estudio de la recuperación elástica en el doblado de chapa asistido por pulsos de alta densidad de corriente* (Trabajo de Fin de Grado). Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/20229/TFG_EUETIB_Memoria.pdf
46. Miguel, V., Coello, J., Martínez, A., y Calatayud, A. (2013). Evaluación del springback mediante ensayos de doblado bajo tensión en condiciones de multiaxialidad típicas de los procesos de embutición profunda. Aplicación a chapa de acero inoxidable AISI 304 DDQ. *Revista de metalurgia*, 49 (3), 165-177. doi: 10.3989/revmetalm.1248
47. Marciniak, Z., Duncan, J.L., Hu, S.J. (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Gran Bretaña: Butterworth-Heinemann.
48. Nan, L., He, Y., Heng, L., Siliang, Y. (2015). Plastic wrinkling prediction in thin-walled part forming process: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29, 1-14. doi: 10.1016/j.cja.2015.09.004
49. Desconocido. (s.f.). *Residual Stress*. Recuperado el 30 de julio del 2018, de <http://www.residualstress.org/media/residual%20stress.pdf>
50. Essa, A., Nasr, M.N.A. y Ahmed, M.H. (2016). Variation of the residual stresses and springback in sheet bending from plane-strain to plane-stress condition using finite element modelling. *Proceedings of the 17th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering*. https://www.researchgate.net/profile/Abd_Elrahman_Essa/publication/306531133_VARIATION_OF_THE_RESIDUAL_STRESSES_AND_SPRINGBACK_IN_SHEET_BENDING_FROM_PLANE-STRAIN_TO_PLANE-

[STRESS CONDITION USING FINITE ELEMENT MODELLING/links/57beef4e08ae2f5eb32e69cc/VARIATION-OF-THE-RESIDUAL-STRESSES-AND-SPRINGBACK-IN-SHEET-BENDING-FROM-PLANE-STRAIN-TO-PLANE-STRESS-CONDITION-USING-FINITE-ELEMENT-MODELLING.pdf?origin=publication_detail](#)

51. Lam, A., Shi, Z., Lin, J. y Huang, X. (s.f.). Influences of residual stresses and initial distortion on springback prediction of 7B04-T651 aluminium plates in creep-age forming. https://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/26154/2/Lam_IJMS2015_accepted%20version.pdf
52. Shehata Fayed, A. (s.f.). *Fundamentals of Metal Forming Processes*. Recuperado el 18 de julio de 2018, de <https://www.slideshare.net/yagamech/metal-forming-2>
53. MIPSAs. (2018). *Características de las series del aluminio*. Recuperado el 18 de julio de 2018, de <https://mipsa.com.mx/dotnetnuke/Sabias-que/Clasificacion-de-aluminio>
54. Abascal, R. y Escribano, A.I. (s.f.). *Doblado y curvado*. Recuperado el 6 de agosto de 2018, de <http://deduce-tu.blogspot.com/p/5doblado-curvado-y-plegado.html>
55. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA). (s.f.). *Tema 11. Endurecimiento por deformación plástica en frío. Recuperación, Recristalización y Crecimiento del grano*. Recuperado el 8 de agosto de 2018, de <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2011.pdf>

Anexo I. Propiedades de los materiales.

En este anexo se exponen una serie de tablas con las propiedades de los materiales según la caracterización realizada a partir de las durezas Brinell obtenidas.

Anexo I.a Propiedades del material 1.

Propiedades físicas material 1		
Densidad	2,70 g/cm³	
Propiedades térmicas material 1		
Punto de fusión	600-650°C	
Propiedades mecánicas material 1		
Dureza	Brinell	78
	Knoop	-
	Rockwell A	-
	Rockwell B	-
	Vickers	-
Tensión de rotura [MPa]		290
Límite elástico [MPa]		220
Elongación en rotura [%]		-
Módulo de elasticidad [GPa]		68-69
Coeficiente de Poisson		0.33

Anexo I.b Propiedades del material 2.

Propiedades físicas Al 5083 H14											
Densidad		2,70 g/cm³									
Propiedades térmicas Al 5083 H14											
Punto de fusión		580-640°C									
Propiedades mecánicas Al 5083 H14											
Dureza		Brinell						102			
		Knoop						-			
		Rockwell A						-			
		Rockwell B						-			
		Vickers						-			
Tensión de rotura [MPa]								360			
Límite elástico [MPa]								290			
Elongación en rotura [%]								3,4			
Módulo de elasticidad [GPa]								68			
Coeficiente de Poisson								0,33			
Propiedades químicas Al 5083 H14											
Elemento		Al	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Otros
Composición [%]	Máx.	95,60	4,90	1,00	0,40	0,40	0,25	0,25	0,15	0,10	0,15
	Mín.	92,40	4,00	0,40	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00

Anexo I.c Propiedades del material 3.

Propiedades físicas Al 2024 T62											
Densidad			2,77-2,78 g/cm³								
Propiedades térmicas Al 2024 T62											
Punto de fusión			640°C								
Propiedades mecánicas Al 2024 T62											
Dureza			Brinell					128-129			
			Knoop					-			
			Rockwell A					-			
			Rockwell B					-			
			Vickers					-			
Tensión de rotura [MPa]							425				
Límite elástico [MPa]							340				
Elongación en rotura [%]							5				
Módulo de elasticidad [GPa]							72,4				
Coeficiente de Poisson							≤ 0,33				
Propiedades químicas Al 2024 T62											
Elemento		Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Cr	Otros
Composición [%]	Máx.	94,69	4,90	1,80	0,90	0,50	0,50	0,25	0,15	0,10	0,00
	Mín.	90,49	3,80	1,20	0,30	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00

Anexo I.d Propiedades del material 4.

Propiedades físicas Al 7475-T761											
Densidad			2,81 g/cm³								
Propiedades térmicas Al 7475-T761											
Punto de fusión			477-635°C								
Propiedades mecánicas Al 7475-T761											
Dureza			Brinell					140			
			Knoop					177			
			Rockwell A					51,6			
			Rockwell B					84			
			Vickers					162			
Tensión de rotura [MPa]								517			
Límite elástico [MPa]								448			
Elongación en rotura [%]								12			
Módulo de elasticidad [GPa]								70,3			
Coeficiente de Poisson								0,33			
Propiedades químicas Al 7475-T761											
Elemento		Al	Si	Cr	Mn	Mg	Cu	Ti	Fe	Zn	Otros
Composición [%]	Máx.	91,52	0,10	0,25	0,06	2,60	1,90	0,06	0,12	6,20	0,15
	Mín.	88,56	0,00	0,18	0,00	1,90	1,20	0,00	0,00	5,20	0,00

Anexo II. Tabla para toma de datos experimentales.

En el anexo II se muestra la tabla utilizada para la anotación de las variables experimentales de interés. Como dato relevante, también se expone en dicha tabla la numeración de las probetas elegida, así como el ángulo de doblado y holgura correspondientes a cada probeta. Al final del anexo II se han adjuntado fotos detalladas de las probetas con la numeración utilizada.

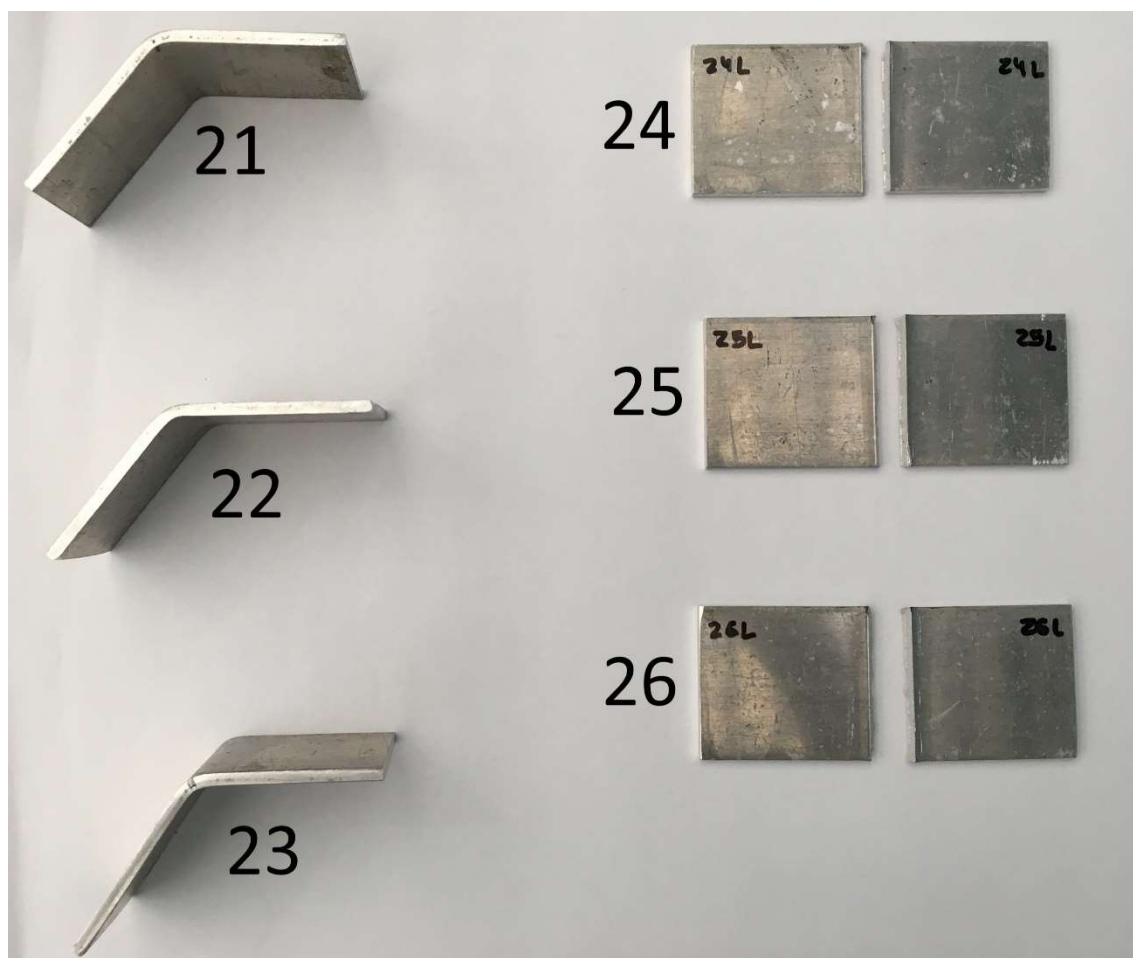
Anexo II.a Tabla de datos.

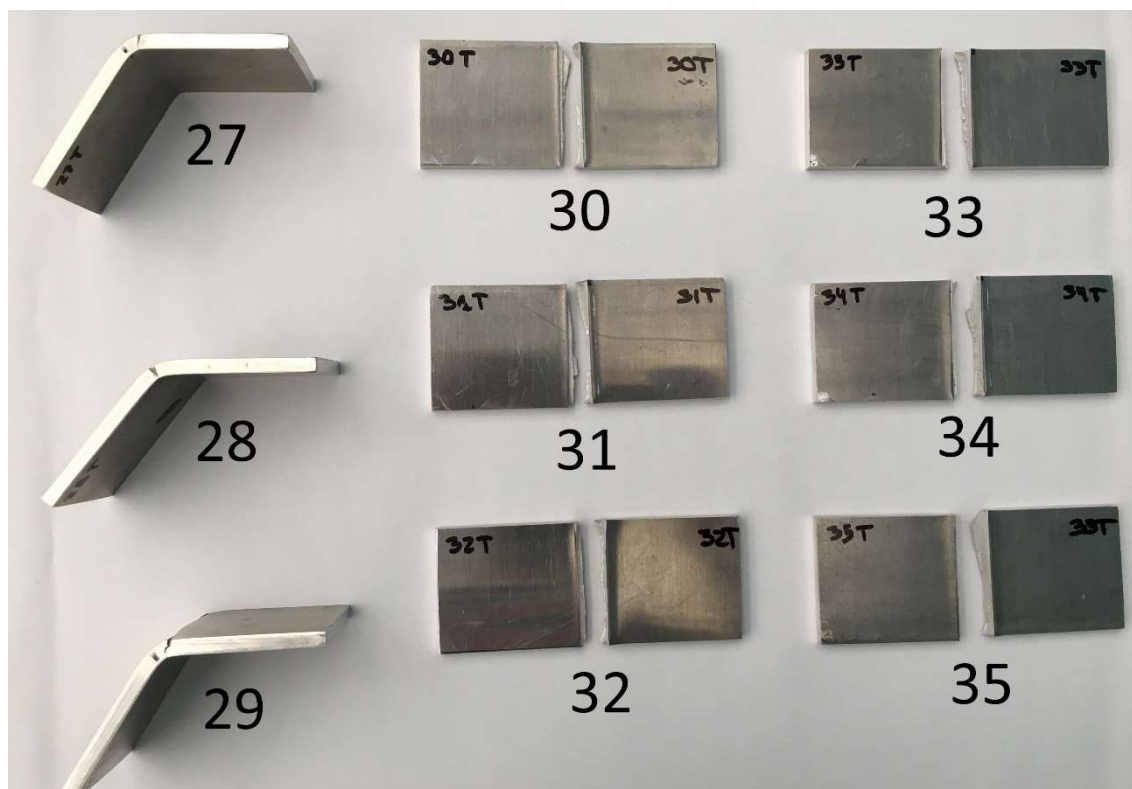
En la primera columna aparece una nomenclatura diferente a la que se usó finalmente, y es que antes de realizar la caracterización de los materiales se usó dicha nomenclatura provisional, pero la que se usa en todo el documento es la realizada a partir de la dureza.

Material nomenclatura antigua	Material según dureza	Espesor efectivo Tefectivo [mm]	Ángulo de doblado α [°]	Holgura H [mm]	N.º probeta /dirección	Doblado	Radio final de doblado Rr [mm]	Recuperación elástica \angle [°]	Observaciones
2	1	78 HB	60	3,1	1	T			
				4,7	2	T			
				6,2	3	T			
			90	3,1	4	T			
				3,1	5	T			
				3,1	6	T			
				4,7	7	T			
				6,2	8	T			
			120	3,1	9	T			
				4,7	10	T			
				6,2	11	T			
3	2	102 HB	60	2,1	12	T			
				3,2	13	T			
				4,2	14	T			
			90	2,1	15	T			
				3,2	16	T			
				4,2	17	T			
			120	2,1	18	T			
				3,2	19	T			
				4,2	20	T			
1	3	128 HB	60	1,7	21	L			
				2,6	22	L			
				3,4	23	L			
			90	1,7	24	L			
				2,6	25	L			
				3,4	26	L			
4	4	146 HB	60	2,5	27	T			
				3,8	28	T			
				5,0	29	T			
			90	2,5	30	T			
				3,8	31	T			
				5,0	32	T			
			120	2,5	33	T			
				3,8	34	T			
				5,0	35	T			

Anexo II.b Imágenes de probetas numeradas.



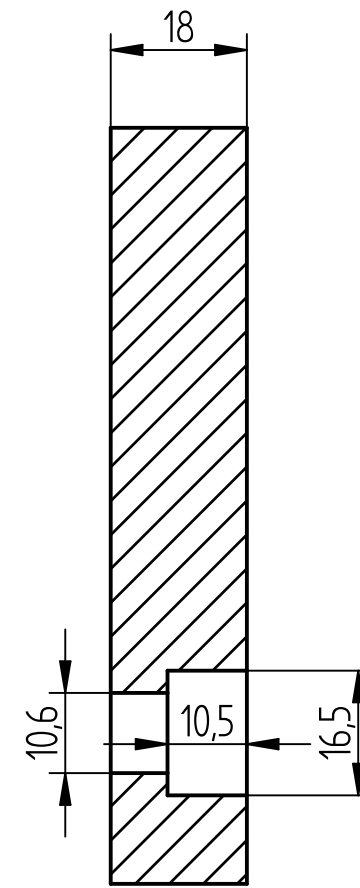
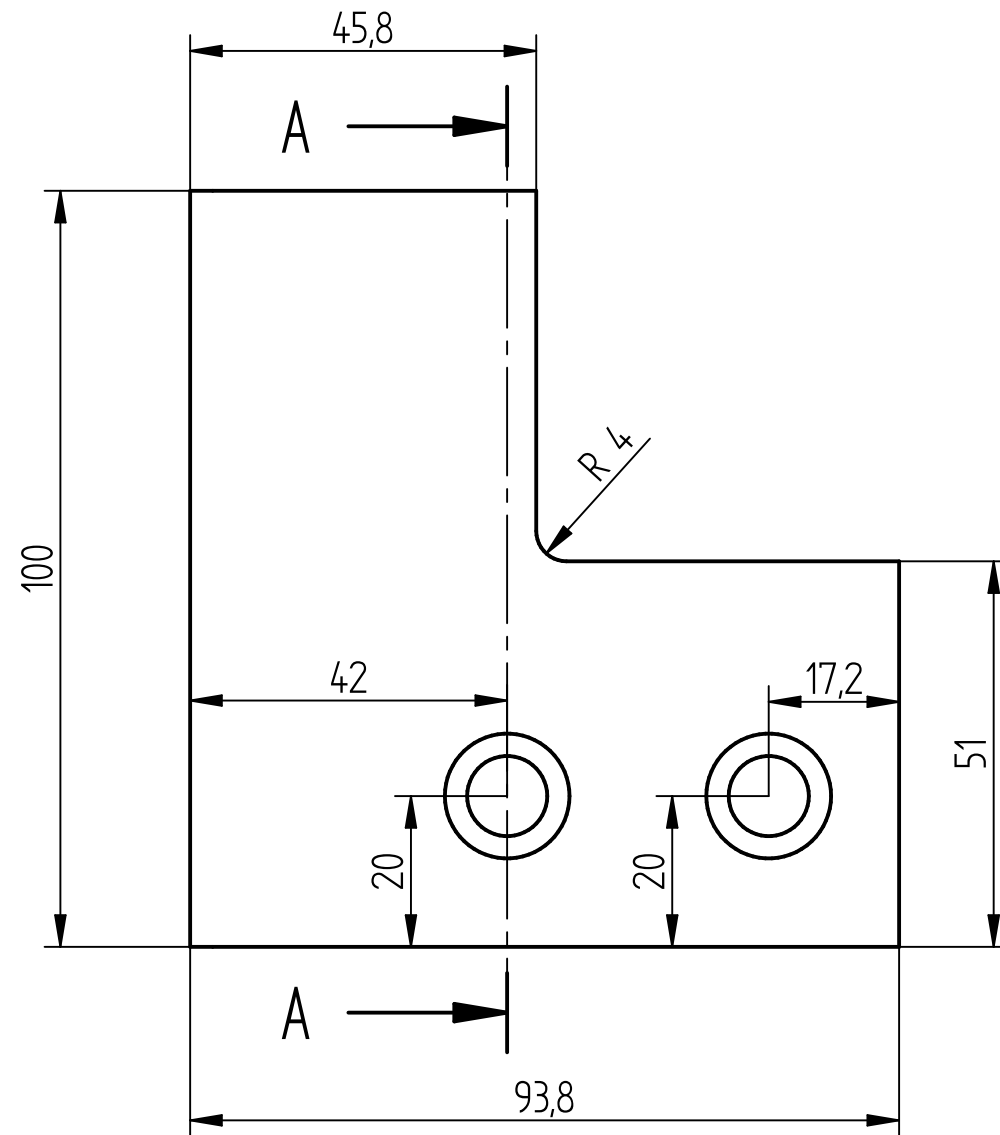




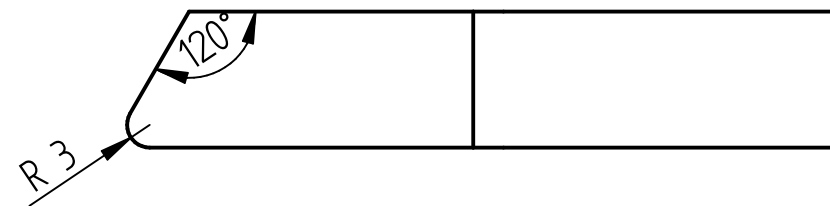
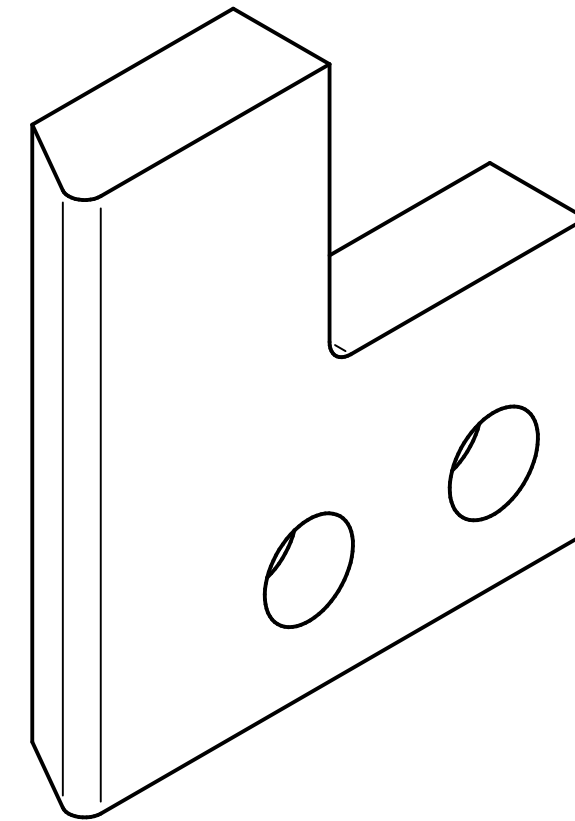
Anexo III. Planos

En este apartado del anexo se han introducido todos aquellos planos realizados de acuerdo con las normas UNE-EN ISO 7200:2004, UNE-EN ISO 5457:2000 y UNE-EN ISO 1027:1995.

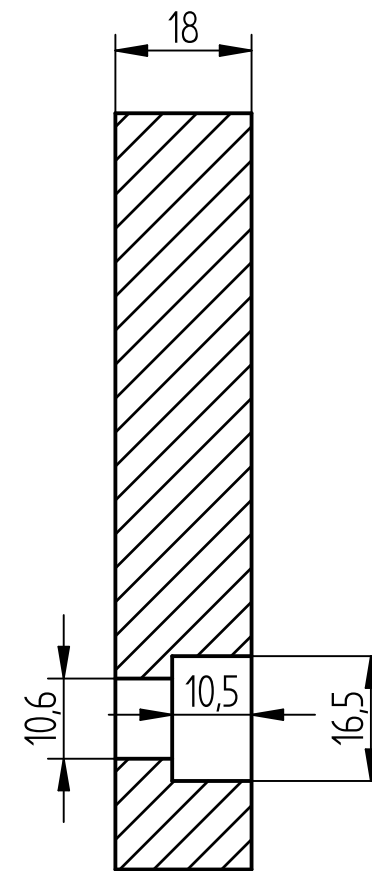
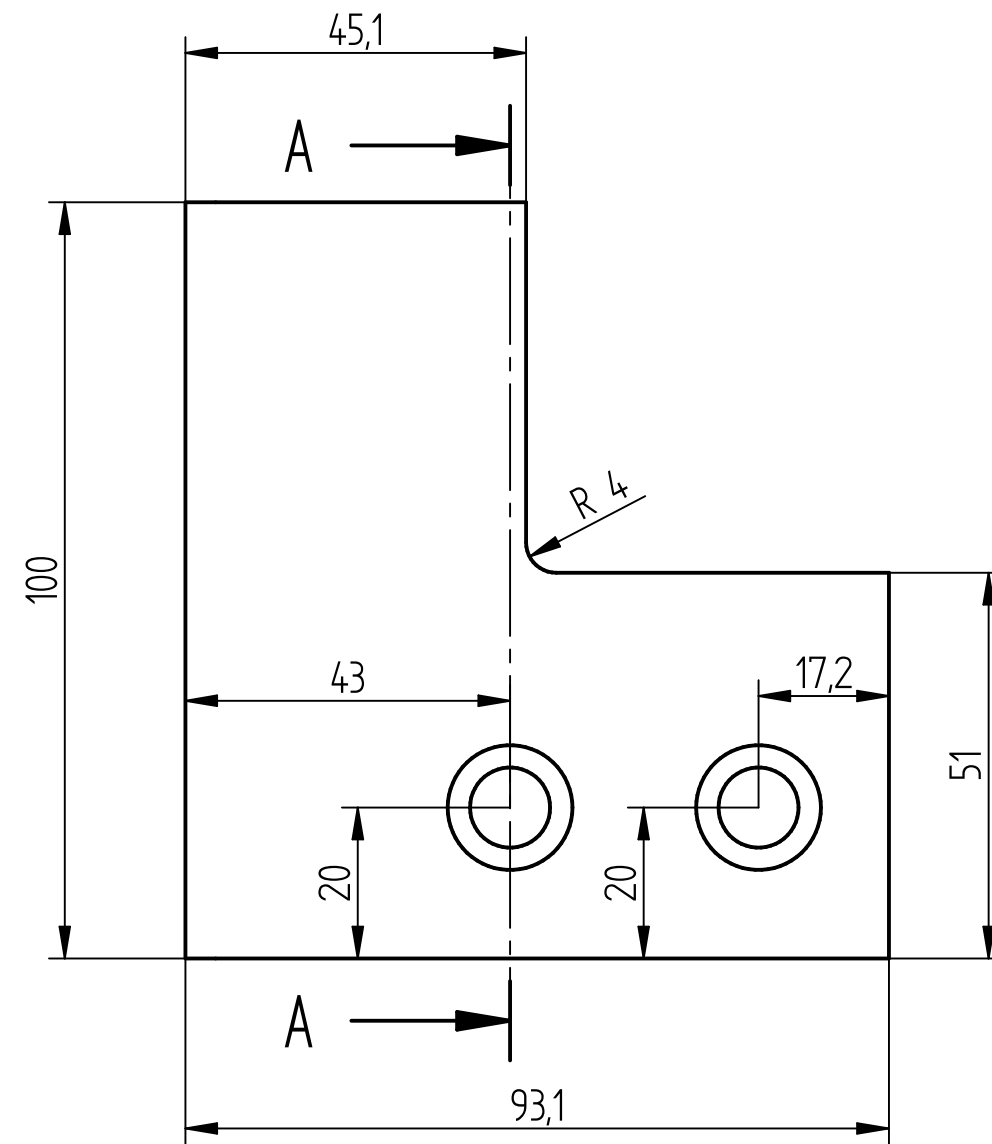
Se adjuntan los planos de las matrices diseñadas de radio de curvatura de 3 mm y 4 mm, de la matriz reacondicionada final y del utillaje regula-holgura diseñado para la matriz.



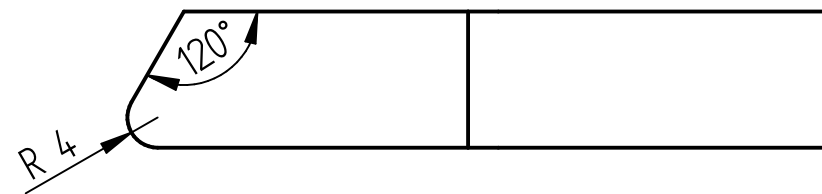
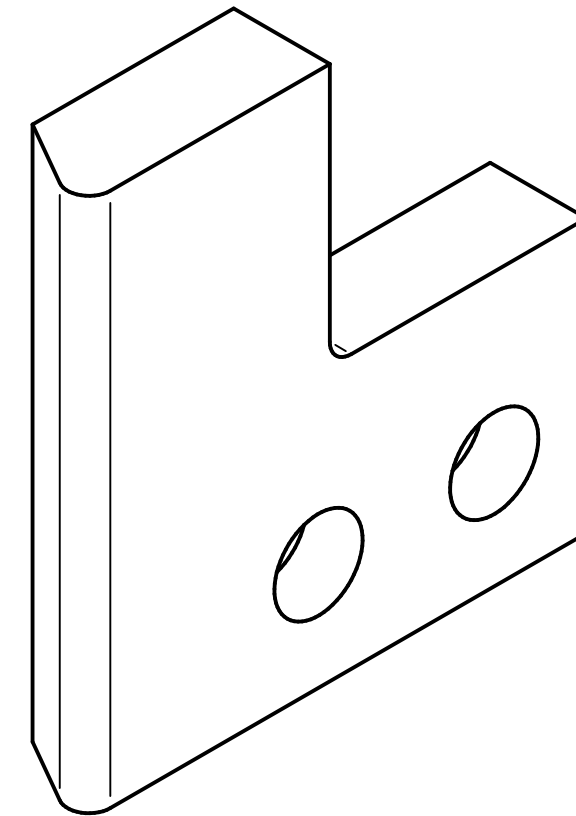
CORTE A-A



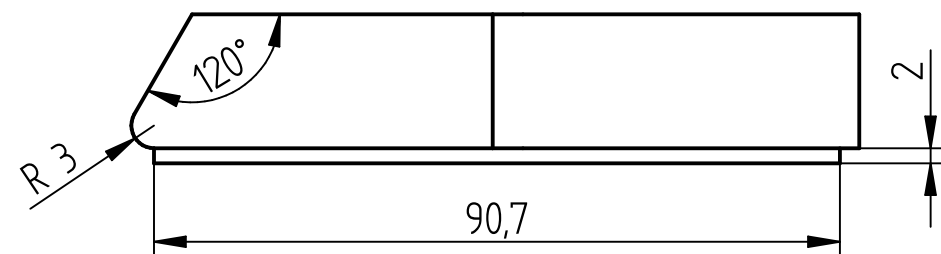
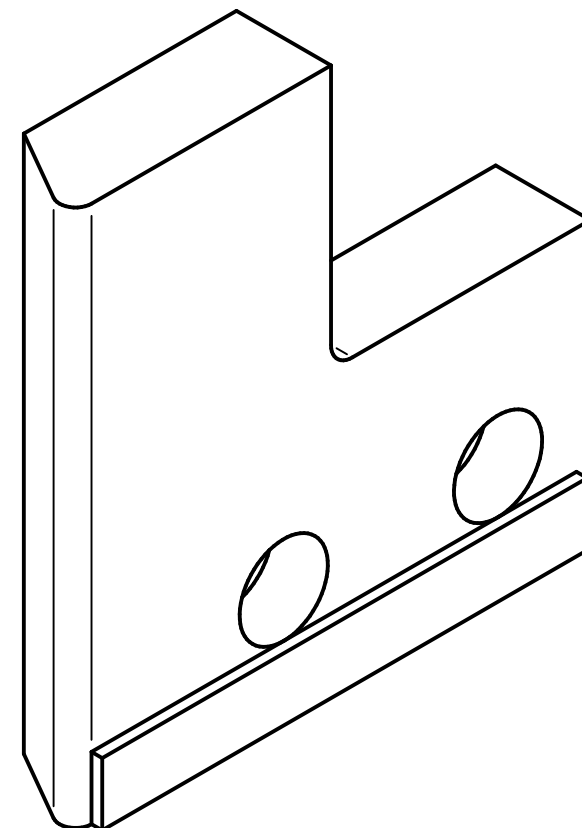
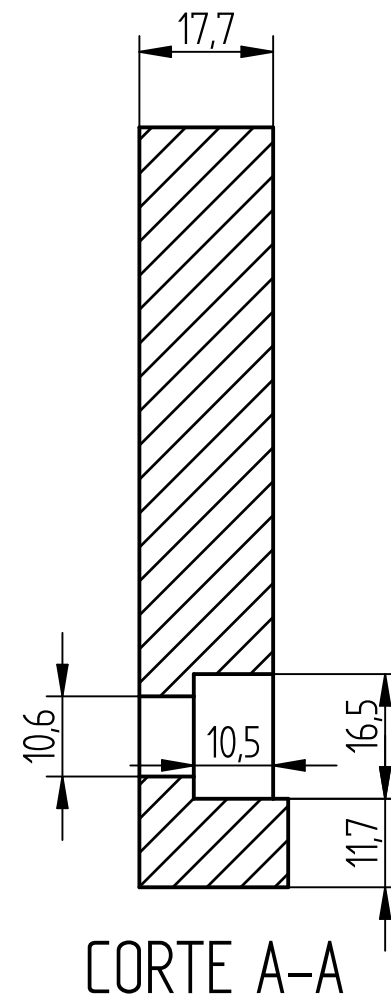
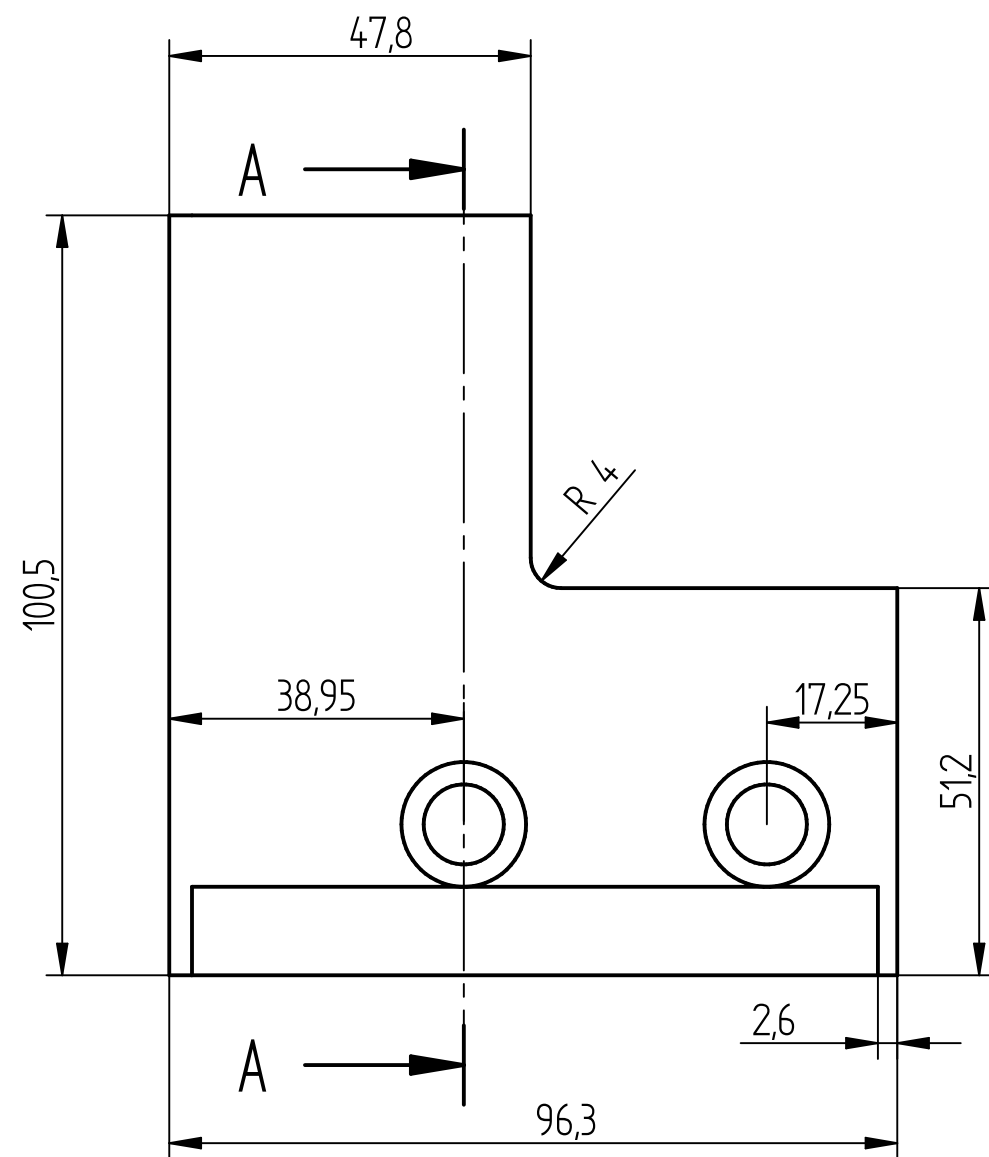
Autor y propietario		Félix Antonio Galisteo Vicente	
Título		Matriz con radio de plegado de 3 mm	
Aprobado por		-	
Tipo de documento		Plano acotado	
Fecha	15/07/2018	 Escuela Técnica Superior de INGENIERÍA DE SEVILLA	
Número de identificación	1		
Tamaño de papel	A3		
Escala	1:1		
Número de hoja	1 de 1		
Estado del documento		Finalizado	



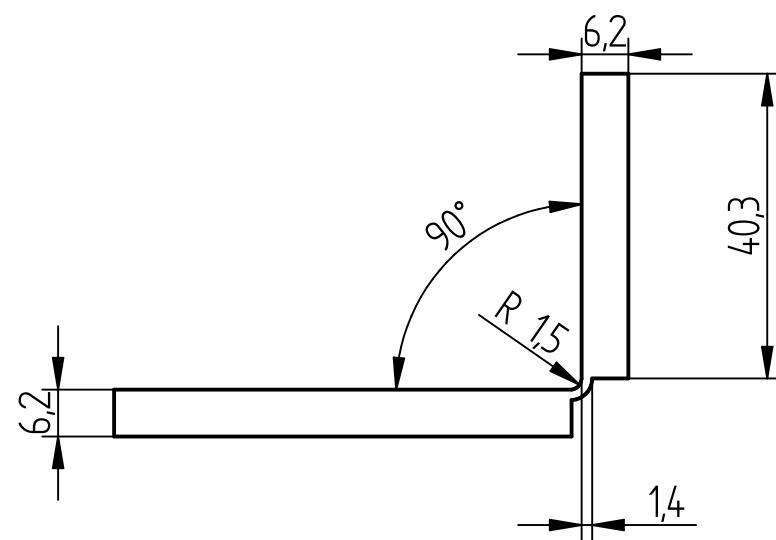
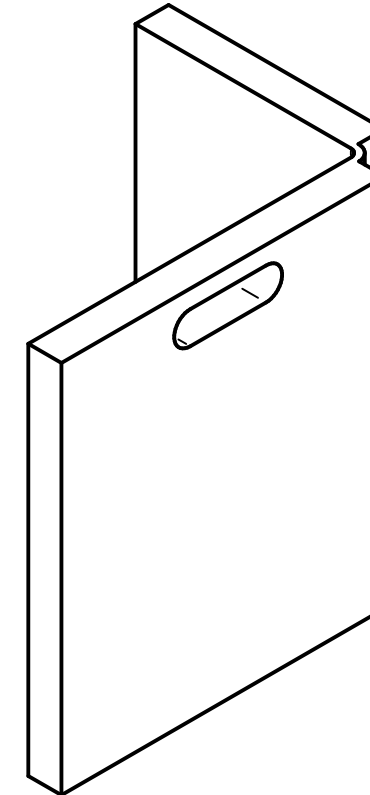
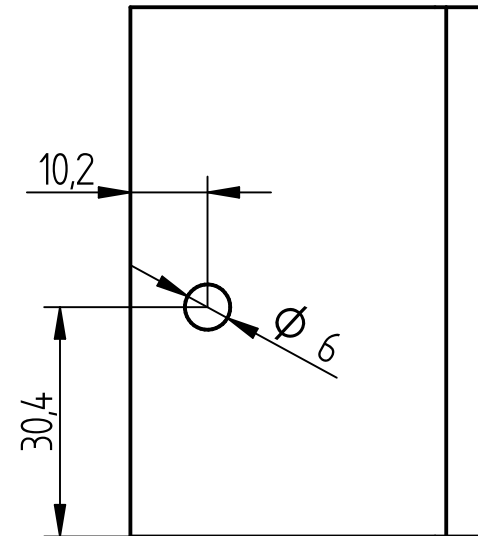
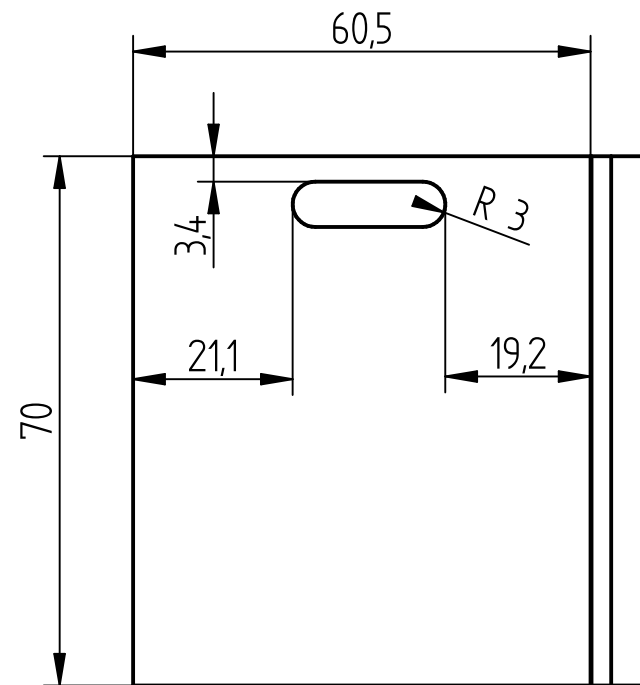
CORTE A-A



Autor y propietario		Félix Antonio Galisteo Vicente	
Título		Matriz con radio de plegado de 4 mm	
Aprobado por		-	
Tipo de documento		Plano acotado	
Fecha	15/07/2018	 Escuela Técnica Superior de INGENIERÍA DE SEVILLA	
Número de identificación	2		
Tamaño de papel	A3		
Escala	1:1		
Número de hoja	1 de 1		
Estado del documento		Finalizado	



Autor y propietario		Félix Antonio Galisteo Vicente	
Título		Matriz reacondicionada	
Aprobado por		-	
Tipo de documento		Plano acotado	
Fecha	15/07/2018	 Escuela Técnica Superior de INGENIERÍA DE SEVILLA	
Número de identificación	3		
Tamaño de papel	A3		
Escala	1:1		
Número de hoja	1 de 1		
Estado del documento		Finalizado	



Autor y propietario		Félix Antonio Galisteo Vicente
Título		Uillaje regulador de holgura
Aprobado por		-
Tipo de documento		Plano acotado
Fecha	15/07/2018	 Escuela Técnica Superior de INGENIERÍA DE SEVILLA
Número de identificación	4	
Tamaño de papel	A3	
Escala	1:1	
Número de hoja	1 de 1	
Estado del documento		Finalizado